





دانشکده علوم زمین
رشته زمین شناسی گرایش زیست محیطی

پایان نامه کارشناسی ارشد

هیدروژئوشیمی زیست محیطی آبخوان دشت ابرکوه، استان یزد

نگارنده: مجتبی مرآت

استاد راهنما

دکتر هادی جعفری

استاد مشاور

دکتر افشین قشلاقی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۱۳۸۷۴
تاریخ: ۹۶/۱۱/۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مجتبی مرآت با شماره دانشجویی ۹۲۳۹۸۶۴ رشته زمین شناسی گرایش زیست محیطی تحت عنوان هیدروژنوشیمی زیست محیطی آبخوان دشت ابرکوه، استان یزد که در تاریخ ۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۰۰٪ درجه عالی) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	هادی جعفری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	افشین قسلاقی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	معصومه کردی	استادیار	
۵- استاد داور اول	گیتی فرقانی	استادیار	
۶- استاد داور دوم	غلامحسین کرمی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مراد لیسری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۳۸۷/۱۱/۲۳



کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیر و تشکر

سپاس بیکران پروردگار یکتا که هستی بخش است و در راه کسب علم و معرفت یاریمان نمود. بر خود لازم می‌دانم از اساتید معظم دانشکده علوم زمین (دانشگاه صنعتی شاهرود)، جناب آقای دکتر هادی جعفری و آقای دکتر افشین قشلاقی که من را در تهیه و تدوین و نگارش این پایان‌نامه راهنمایی و مشاوره نمودند، قدردانی نمایم. همچنین از جناب آقای مهندس محمدعلی امیربیکری کارشناس ارشد شرکت آب منطقه‌ای یزد به جهت کسب آمار و اطلاعات و عملیات نمونه برداری، جناب آقای دکتر داریوش پورسراجیان رییس محترم پارک علم و فناوری یزد، جناب آقای دکتر احمدرضا فقیه خراسانی معاون فناوری و آقای مهندس شهرام شکوهی معاون پشتیبانی پارک علم و فناوری یزد که در انجام آنالیزهای مربوطه و خدمات آزمایشگاهی یاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

مجتبی مرآت

بهمن ۱۳۹۶

تعهد نامه

این جانب مجتبی مرآت دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی گرایش زیست محیطی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه هیدروژئوشیمی زیست محیطی آبخوان دشت ابرکوه، استان یزد تحت راهنمایی آقای دکتر هادی جعفری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

آبخوان ابرکوه در جنوب غربی شهر یزد و در مرکز ایران واقع شده است. فعالیت‌های کشاورزی در دشت ابرکوه، بیشترین بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی را دارند که می‌توانند موجب تغییرات کیفی و آلودگی آب‌های زیرزمینی شوند. هدف از این پژوهش بررسی هیدروژئوشیمی زیست‌محیطی آبخوان ابرکوه به منظور شناسایی مهمترین منابع احتمالی آلودگی از جمله نیترات و فلزات سنگین است. در این راستا، ۳۷ نمونه آب جمع‌آوری و جهت تعیین غلظت یون‌های اصلی (Ca، Mg، Na، K، Cl، HCO_3^- و SO_4^{2-})، نیترات و عناصر بالقوه سمی از جمله آرسنیک (As)، سرب (Pb) و کادمیم (Cd) و مقادیر EC و pH آنالیز شدند. مقدار هدایت الکتریکی (EC) از محل تغذیه در غرب، در جهت جریان به سمت شرق آبخوان در مجاورت کفه نمکی (پلایا) افزایش می‌یابد. ترتیب فراوانی غلظت آنیون‌های اصلی به صورت $\text{Cl}^- >> \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ و کاتیون‌های اصلی به صورت $\text{Na}^+ >> \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ است. با توجه به تغییرات مکانی هدایت الکتریکی و ارتباط آن با غلظت یون‌های اصلی، نمونه‌های برداشت شده به دو گروه $\text{EC} \leq 2050 \mu\text{s/cm}$ و $\text{EC} > 2050 \mu\text{s/cm}$ تفکیک شدند. بیشترین غلظت یون کلر و سدیم در شرق آبخوان وجود دارد که ناشی از نفوذ آب شور به علت افت سطح آب زیرزمینی با برداشت بیش از حد از آبخوان و معکوس شدن جهت جریان آب زیرزمینی است. آبخوان ابرکوه دارای تیپ و رخساره هیدروشیمیایی غالب نیست و احتمالاً ناشی از اختلاط آبها با منشأ تغذیه در غرب و نفوذ آب شور از کفه (پلایا) در شرق است. غلظت فلزات سرب و کادمیم همبستگی بالایی با غلظت یون‌های سدیم و کلر و مقدار هدایت الکتریکی دارند و به علت نفوذ آب شور، منشأ آن زمین‌زاد است. افزایش غلظت یون نیترات در غرب آبخوان ناشی از عدم مدیریت لازم در استفاده از کودهای کشاورزی می‌باشد. منشأ شبه فلز آرسنیک در آبخوان زمین‌زاد است. از روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) در تعیین منشأ استفاده شده است. در این پژوهش عوامل انسان‌زاد مانند فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان ابرکوه مهمترین نقش را در آلودگی آن دارند.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، یون نیترات، انسان‌زاد، زمین‌زاد، ابرکوه، یزد

مقالات مستخرج از این پایان نامه

داخلی:

۱- مدیریت زیست محیطی منابع آب و توسعه پایدار «مطالعه موردی آبخوان دشت ابرکوه یزد»، همایش ملی «توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی استان یزد، محور آب و محیط زیست، دانشگاه یزد، شهریور ۱۳۹۵.

۲- ارزیابی هیدروژئوشیمی کیفیت آب زیرزمینی دشت ابرکوه، استان یزد، اولین کنفرانس بین المللی آب، محیط زیست و توسعه پایدار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، ۶ تا ۸ مهر ۱۳۹۵.

خارجی:

1. Assessing the Source of Nitrate and Heavy Metals Contaminants in Groundwater Resources of Abarkooh Plain, Central Iran. 10th WORLD CONGRESS on Water Resources and Environment , “Panta Rhei” 5-9 July 2017, Athens, Greece.

2. European Water 58: 143-150, 2017.

© 2017 E.W. Publications

فهرست مطالب

فصل اول، کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- بیان مسأله و هدف از انجام تحقیق	۲
۳-۱- موقعیت آبخوان ابرکوه	۳
۴-۱- آب و هوای دشت ابرکوه	۴
۵-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه	۶
۱-۵-۱- پالئوزوئیک (پرمین)	۶
۲-۵-۱- مزوزوئیک (تریاس)	۶
۳-۵-۱- سنوزوئیک (واحد‌های پلیوسن - کواترنر)	۷
۶-۱- هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه	۱۱
فصل دوم، مروری بر تحقیقات گذشته	۱۵
۱-۲- مبانی نظری و علمی پژوهش	۱۶
۱-۱-۲- بررسی مهمترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی	۱۶
۲-۱-۲- نقش پلایا و کانی‌های تبخیری در کیفیت آبخوان‌ها	۲۱
۲-۲- مروری بر تحقیقات پیشین در ایران	۲۳
۳-۲- مروری بر تحقیقات پیشین خارجی	۲۵
فصل سوم، روش انجام کار	۲۹
۱-۳- مقدمه	۳۰
۲-۳- نمونه‌برداری از منابع آبی	۳۰
۳-۳- آنالیز نمونه‌ها	۳۲
۱-۳-۳- یون‌های اصلی و نیترات	۳۲
۲-۳-۳- فلزات سنگین	۳۳

۳۴	۴-۳- تحلیل داده‌ها
۳۸	فصل چهارم، نتایج و بحث
۳۹	۱-۴- مقدمه
۳۹	۲-۴- هیدروژنولوژی آبخوان ابرکوه
۴۳	۳-۴- ارزیابی کیفی آبخوان ابرکوه
۴۲	۱-۳-۴- تغییرات مکانی هدایت الکتریکی (EC)
۴۴	۱-۱-۳-۴- ارتباط هدایت الکتریکی با یون‌های اصلی
۴۶	۲-۳-۴- تغییرات مکانی pH
۴۸	۳-۳-۴- بررسی تغییرات غلظت یون‌های اصلی
۵۲	۱-۳-۳-۴- نمودار شولر
۵۳	۱-۳-۳-۴- تیپ و رخساره هیدروشیمیایی
۵۶	۳-۳-۳-۴- بررسی تغییرات مکانی سایر یون‌های اصلی
۵۹	۴-۳-۴- بررسی تغییرات مکانی آنیون نیتрат
۶۱	۱-۴-۳-۴- ارتباط آنیون نیترات با هدایت الکتریکی
۶۱	۲-۴-۳-۴- ارتباط آنیون نیترات با یون‌های اصلی
۶۴	۴-۴- بررسی تغییرات مکانی فلزات سنگین منتخب
۶۴	۱-۴-۴- آرسنیک
۶۷	۲-۴-۴- کادمیم
۶۹	۳-۴-۴- سرب
۷۱	۵-۴- بررسی منشأ یون‌ها و فلزات سنگین
۷۱	۱-۵-۴- یون‌های اصلی
۸۱	۲-۵-۴- یون نیترات
۸۱	۳-۵-۴- فلزات سنگین

۸۴	۶-۴- تحلیل آماری
۸۴	۶-۴-۱- ضریب همبستگی داده‌ها
۸۵	۶-۴-۲- تحلیل آماری مؤلفه اصلی PCA
۸۷	فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۸	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- نتایج
۹۳	۵-۳- پیشنهادها
۹۴	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ سه مؤلفه (ستون‌های) توسعه پایدار ۲
- شکل ۲-۱ موقعیت آبخوان دشت ابرکوه و راه‌های دسترسی به آن ۴
- شکل ۳-۱ نمودار امپروترمیک یک دوره ۱۰ ساله منطقه مورد مطالعه ۶
- شکل ۴-۱ نمایی از سازند شتری در غرب فراغه (ابرکوه) ۷
- شکل ۵-۱ رسوبات کویری و سیلابی دانه ریز (کفه‌های گلی و نمکی) ۸
- شکل ۶-۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده آبخوان دشت ابرکوه ۱۰
- شکل ۷-۱ موقعیت و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری، قنات و چشمه در محدوده آبخوان ابرکوه ۱۲
- شکل ۸-۱ هیدروگراف واحد دشت ابرکوه در بازه زمانی مهر ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۹۰ ۱۴
- شکل ۱-۲ عوامل مؤثر بر شیمی آب زیرزمینی ۱۹
- شکل ۱-۳ موقعیت نقاط نمونه‌برداری از آبخوان ابرکوه ۳۱
- شکل ۱-۴ نقشه هم‌پتانسیل آبخوان ابرکوه (حداکثر تراز سطح ایستابی در فروردین ۱۳۹۴) ۴۰
- شکل ۲-۴ نقشه هم‌پتانسیل آبخوان ابرکوه (حداقل تراز سطح ایستابی در اسفند ۱۳۹۴) ۴۰
- شکل ۳-۴ جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان ابرکوه ۴۱
- شکل ۴-۴ تغییرات هدایت الکتریکی در محدوده آبخوان ابرکوه ۴۳
- شکل ۵-۴ تغییرات غلظت کاتیون‌های اصلی در برابر هدایت الکتریکی ۴۵
- شکل ۶-۴ تغییرات غلظت آنیون‌های اصلی در برابر هدایت الکتریکی ۴۶
- شکل ۷-۴ تغییرات pH در محدوده آبخوان ابرکوه ۴۷
- شکل ۸-۴ تغییرات pH در برابر هدایت الکتریکی نمونه‌های آبخوان ابرکوه ۴۸
- شکل ۹-۴ پارامترهای آماری مربوط به یون‌های اصلی آبخوان ابرکوه ۴۹
- شکل ۱۰-۴ توزیع غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها همراه با افزایش شوری (هدایت الکتریکی) ۵۰
- شکل ۱۱-۴ تغییرات غلظت یون سدیم در محدوده آبخوان ابرکوه ۵۱
- شکل ۱۲-۴ تغییرات غلظت یون کلر در محدوده آبخوان ابرکوه ۵۱

- شکل ۴-۱۳ نمودار شولر نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه (گروه یک) ۵۲
- شکل ۴-۱۴ نمودار شولر نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه (گروه دو) ۵۳
- شکل ۴-۱۵ نمودارهای پایپر و موقعیت نمونه‌های گروه اول (G1) و دوم (G2) ۵۵
- شکل ۴-۱۶ موقعیت نمونه‌های گروه اول (G1) و دوم (G2) برداشت شده از آبخوان ابرکوه ۵۶
- شکل ۴-۱۶-۱ تغییرات غلظت کاتیون‌های منیزیم، کلسیم و پتاسیم در محدوده آبخوان ابرکوه ۵۸
- شکل ۴-۱۷ تغییرات غلظت آنیون‌های بیکربنات و سولفات در محدوده آبخوان ابرکوه ۵۹
- شکل ۴-۱۸ تغییرات غلظت آنیون نیترات در آبخوان ابرکوه ۶۰
- شکل ۴-۱۹ تغییرات غلظت نیترات در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه ۶۱
- شکل ۴-۲۰ تغییرات غلظت نیترات در برابر غلظت آنیون‌های اصلی در آبخوان ابرکوه ۶۲
- شکل ۴-۲۱ تغییرات غلظت نیترات در برابر غلظت کاتیون‌های اصلی در آبخوان ابرکوه ۶۳
- شکل ۴-۲۲ تغییرات غلظت آرسنیک در آبخوان ابرکوه ۶۶
- شکل ۴-۲۳ تغییرات غلظت آرسنیک در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه ۶۶
- شکل ۴-۲۴ تغییرات غلظت آرسنیک در برابر غلظت یون‌های نیترات و سولفات ۶۷
- شکل ۴-۲۵ تغییرات غلظت کادمیم در آبخوان ابرکوه ۶۸
- شکل ۴-۲۶ تغییرات غلظت کادمیم در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه ۶۹
- شکل ۴-۲۷ تغییرات غلظت سرب در آبخوان ابرکوه ۷۰
- شکل ۴-۲۸ تغییرات غلظت سرب در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه ۷۰
- شکل ۴-۲۹ نمودارهای گیس، مکانیزم کنترل ترکیب شیمیایی آبخوان ابرکوه ۷۲
- شکل ۴-۳۰ نمودار تغییرات شاخص اشباع کانی‌های هالیت، ژیپس و انیدریت ۷۴
- شکل ۴-۳۱ نمودار تغییرات شاخص اشباع کانی‌های دولومیت، کلسیت و آراگونیت ۷۴
- شکل ۴-۳۲ رابطه (خطی) بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم ۷۶
- شکل ۴-۳۳ رابطه (خطی) بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم در دو گروه ۷۶
- شکل ۴-۳۴ رابطه (خطی) بین تغییرات یون‌های سولفات و کلسیم در نمونه‌های آبخوان ابرکوه ۷۷

شکل ۳۵-۴ تغییرات غلظت Na^+/Cl^- در برابر غلظت $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ ۷۹

شکل ۳۶-۴ تغییرات نسبت غلظت Na^+/Cl^- در برابر EC نمونه‌های آبخوان ابرکوه ۸۰

شکل ۳۷-۴ تغییرات غلظت $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ در برابر غلظت $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ ۸۰

شکل ۳۸-۴ رابطه بین تغییرات غلظت یون‌های سرب و کادمیم در نمونه‌های آبخوان ابرکوه ۸۲

شکل ۳۹-۴ نمایش سه بعدی مؤلفه‌های اصلی استخراج شده ۸۶

فهرست جدول‌ها

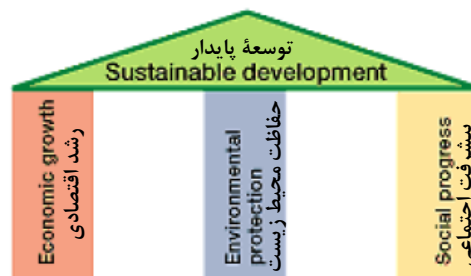
- جدول ۱-۱ میانگین دما و بارندگی ماهانه در یک دوره ۱۰ ساله منطقه مورد مطالعه ۵
- جدول ۱-۲ رده‌بندی اقلیمی دمارتن ۵
- جدول ۱-۳ نتایج آنالیز فلزات سنگین در نمونه‌های آب A3 و A14 از آبخوان ابرکوه ۳۳
- جدول ۲-۳ نتایج آنالیز یون‌های اصلی و نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی ۳۵
- جدول ۳-۳ نتایج آنالیز فلزات سنگین منتخب در نمونه‌های آب زیرزمینی ۳۷
- جدول ۱-۴ خلاصه آمار توصیفی پارامترهای هیدروشیمیایی در آبخوان ابرکوه ۴۲
- جدول ۲-۴ متوسط شاخص اشباع کانی‌های انحلال‌پذیر در آبخوان ابرکوه ۷۳
- جدول ۳-۴ ضریب همبستگی بین داده‌های هیدروشیمیایی نمونه‌های آبخوان ابرکوه ۸۴
- جدول ۴-۴ مؤلفه‌های اصلی استخراج شده به روش چرخش با حداکثر واریانس ۸۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

توسعه پایدار توسعه‌ای است که نیازهای زمان حال را برآورده سازد، بدون آنکه توانایی نسل‌های آینده را در برآورده‌سازی نیازهایشان به خطر اندازد. توسعه‌ای که تضمین دهد، استفاده از منابع و محیط زیست در زمان کنونی هیچ آسیبی به دورنمای استفاده نسل آینده وارد نمی‌سازد. توسعه پایدار دارای سه مؤلفه اصلی یا سه ستون اقتصاد، اجتماع و محیط زیست است، (شکل ۱-۱). آب کلید اصلی توسعه پایدار محسوب می‌شود، بنابراین مدیریت منابع آب، شرط لازم توسعه پایدار می‌باشد (سامانی، ۱۳۸۴). هدف جهانی، تضمین امنیت آب برای توسعه پایدار است (UNESCO 2014). منابع آبی به ویژه آب شیرین منبعی تمام‌شدنی و تخریب‌پذیر خصوصاً در مناطق کویری و گرم و خشک است. عوامل زیست‌محیطی مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی، شامل عوامل طبیعی و غیر طبیعی است که با بررسی این عوامل می‌توان میزان تخریب کیفی آبخوان‌ها را پیش‌بینی نمود تا بتوان بهره‌برداری بهینه از این منبع اقتصادی و با ارزش را مدیریت کرد.



شکل ۱-۱ سه مؤلفه (ستون‌های) توسعه پایدار (Adams 2006)

۱-۲- بیان مسأله و هدف از انجام تحقیق

دشت ابرکوه یکی از دشتهای مهم واقع در جنوب غرب استان یزد از لحاظ توسعه فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و تأمین نیاز آب استان از آب‌های زیرزمینی است. مهمترین و بیشترین فعالیت در این دشت کشاورزی می‌باشد. سطح زیر کشت تحت پوشش چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق جمعاً ۱۱۴۲۹ هکتار و حجم کل مصرف چاه‌ها در دشت ۱۶۳ میلیون متر مکعب در سال است (مهندسیین

مشاور پورآب، ۱۳۹۱). از سال ۱۳۶۱، از لحاظ میزان ذخیره و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، این دشت بحرانی اعلام شده است (شرکت آب منطقه‌ای، ۱۳۹۱). با برداشت بیش از حد از آبخوان و ایجاد افت سالانه سطح ایستابی و افزایش املاح یا هدایت الکتریکی آب، احتمال بروز تغییرات در کیفیت و مشخصات زیست محیطی این آبخوان وجود دارد. تغییرات کیفی و زیست-محیطی آبخوان و عوامل مؤثر بر آن از نظر ویژگی‌های هیدروشیمیایی و هیدروژئوشیمیایی قابل بررسی و ارزیابی هستند. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی تأثیر عوامل طبیعی (زمین‌زاد) و انسان-زاد (به ویژه فعالیت‌های کشاورزی) مؤثر بر کیفیت آبخوان است که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به مدیریت بهره‌برداری فعلی و برنامه‌ریزی جهت مدیریت بهینه و حفظ آبخوان منتهی شود. به طور کلی اهداف این پژوهش عبارتست از:

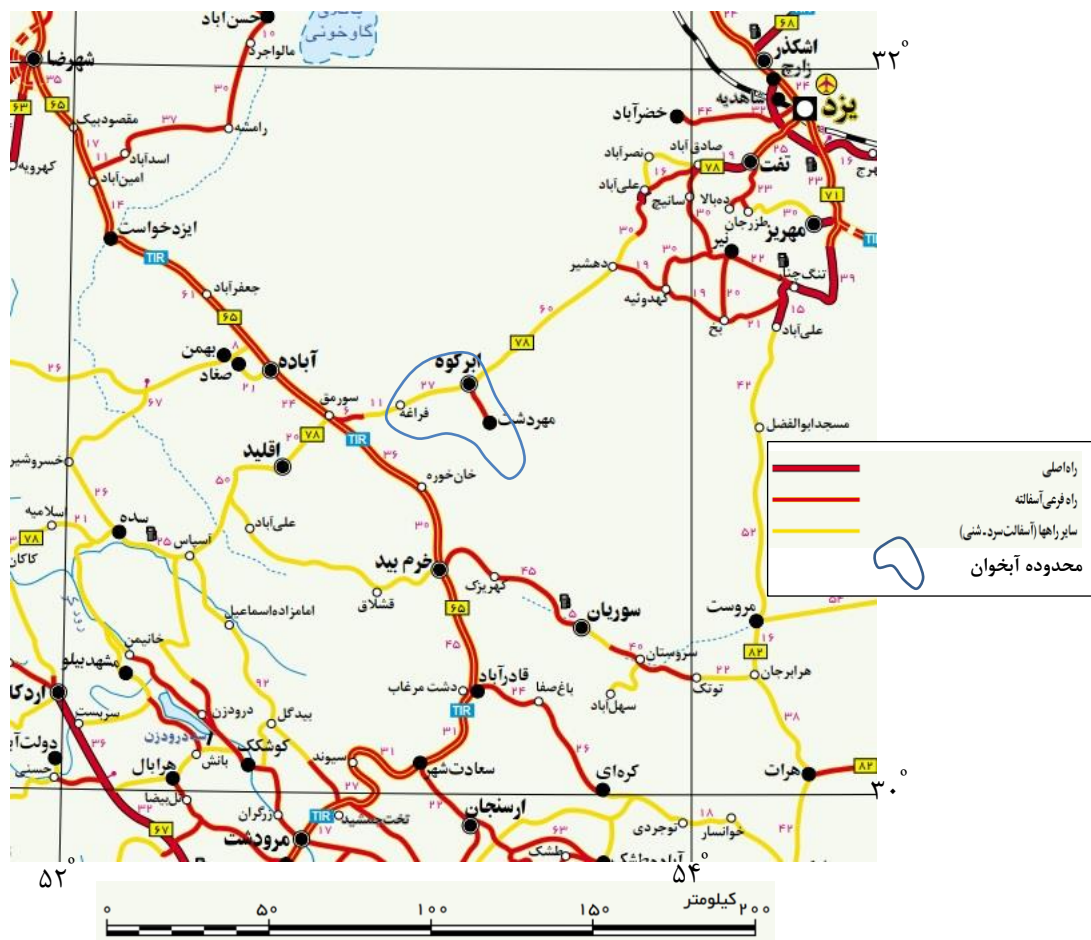
الف- بررسی تغییرات کیفیت آبخوان ابرکوه و مهمترین عوامل مؤثر بر آن.

ب- بررسی عوامل مخرب کیفیت زیست محیطی آبخوان.

ج- تعیین محدوده‌های بحرانی از لحاظ کیفیت زیست محیطی آبخوان.

۱-۳- موقعیت آبخوان ابرکوه

آبخوان دشت ابرکوه با مساحتی حدود ۱۲۵۰ کیلومتر مربع در حوضه آبریز ابرکوه (با وسعتی بیش از ۷۰۰۰ کیلومتر مربع) قرار گرفته است و جزئی از حوضه بزرگ آبریز مرکزی ایران و حوضه آبریز کویر ابرکوه- سیرجان می‌باشد. آبخوان دشت ابرکوه به فاصله ۱۴۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان یزد واقع شده است. راه دسترسی به محدوده مورد مطالعه (شهرستان ابرکوه) از طریق راه اصلی یزد - شیراز، ۱۷ کیلومتری سورمق (واقع در جاده اصلی اصفهان - شیراز) می‌باشد (شکل ۱-۲). آبخوان ابرکوه در بخشی از گستره دشت شکل گرفته و از شمال تقریباً به رودخانه شور، از شمال غرب، غرب، جنوب غرب و جنوب به دامنه شرقی مجموعه ارتفاعات جداکننده محدوده‌های ابرکوه و آباده - اقلید و از شرق به حواشی کویر ابرکوه محدود می‌شود.



شکل ۱-۲ موقعیت آبخوان دشت ابرکوه و راه‌های دسترسی به آن
(اقتباس از نقشه راه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور)

۱-۴- آب و هوای دشت ابرکوه

دشت ابرکوه دارای آب و هوای کویری است. جهت بررسی آب و هوا و اقلیم منطقه مورد مطالعه از آمار هواشناسی یک دوره ده ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۵) از ایستگاه ابرکوه استفاده شد. این دوره آماری شامل میانگین دما و بارندگی ماهانه می‌باشد که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است. بیشترین مقدار بارندگی در ماه فروردین و بیشینه دما در ماه تیر می‌باشد. همچنین کمترین میزان بارندگی در این دوره ده ساله به طور میانگین در ماه مرداد و حداقل دما نیز در ماه دی رخ داده است. میانگین سالانه بارندگی و دما به ترتیب $54/4$ میلی‌متر و $18/5$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

در این مطالعه جهت تعیین اقلیم منطقه از ضریب یا شاخص خشکی دمارتن^۱ و نمودار امبروترمیک^۲ جهت نشان دادن دوره‌های خشک و تر در یک سال استفاده شده است. شاخص دمارتن عبارتست از $I = \frac{P}{T+10}$ که در آن P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)، T متوسط دمای سالانه (درجه سانتی-گراد) و I شاخص خشکی بر اساس رده‌بندی جدول ۱-۲ می‌باشد. شاخص I در منطقه مورد مطالعه برابر ۱/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده اقلیم خشک است. نمودار امبروترمیک (شکل ۱-۳) نشان می‌دهد که فاقد دوره تر و تماماً دوره خشک حاکم می‌باشد.

جدول ۱-۱ میانگین دما و بارندگی ماهانه در یک دوره ۱۰ ساله منطقه مورد مطالعه (۱۳۹۴-۱۳۸۵، ایستگاه ابرکوه)

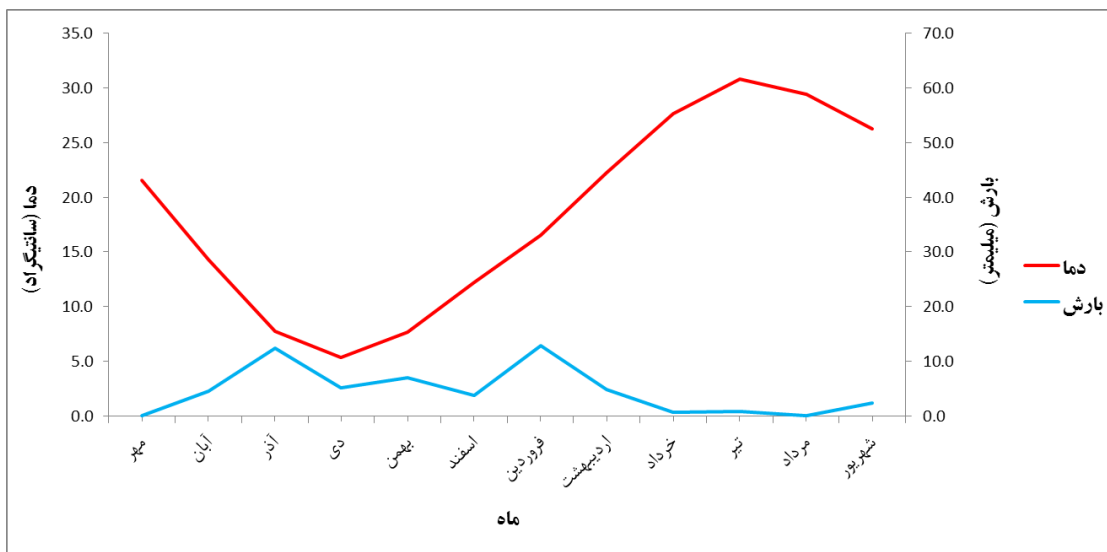
ماه	میانگین درجه حرارت ماهانه (درجه سانتی‌گراد)	میانگین بارندگی ماهانه (میلی‌متر)
فروردین	۱۶/۵	۱۲/۹
اردیبهشت	۲۲/۲	۴/۸
خرداد	۲۷/۷	۰/۶
تیر	۳۰/۸	۰/۹
مرداد	۲۹/۴	۰/۰
شهریور	۲۶/۲	۲/۳
مهر	۲۱/۶	۰/۱
آبان	۱۴/۳	۴/۶
آذر	۷/۷	۱۲/۵
دی	۵/۳	۵/۱
بهمن	۷/۷	۷/۱
اسفند	۱۲/۲	۳/۷
سالانه	۱۸/۵	۵۴/۴

جدول ۱-۲ رده‌بندی اقلیمی دمارتن

نوع اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن
خشک	کوچکتر از ۱۰
نیمه‌خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه‌مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگتر از ۳۵

¹ Aridity index of De Martonne

² Ombrothermic diagram



شکل ۱-۳ نمودار امپروترمیک یک دوره ۱۰ ساله منطقه مورد مطالعه (۱۳۹۴-۱۳۸۵، ایستگاه ابرکوه)

۵-۱- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به نقشه زمین‌شناسی ابرکوه با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ که در برگ‌برنده آبخوان ابرکوه است. مهمترین واحدها و سازندهای زمین‌شناسی محدوده آبخوان طبق نقشه زمین‌شناسی تهیه شده (شکل ۱-۶) به شرح ذیل می‌باشد.

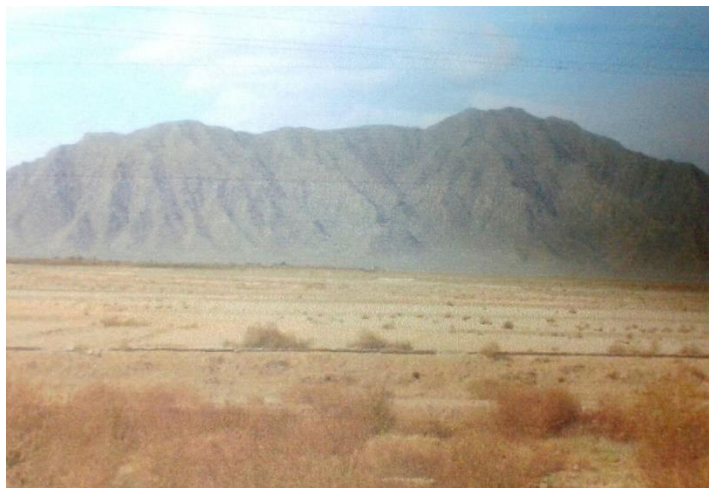
۱-۵-۱- پالئوزوئیک (پرمین) - واحد pj^d (سازند جمال)

واحد pj^d سنگی با وسعت کم در شمال و شمال غربی روستای فراغه (شکل ۱-۶) رخنمون دارد که شامل رخنمون‌های سازند جمال با بخش اصلی و زیرین سازند شامل دولومیت سفید همراه با شیل و میان لایه‌های آهکی و بخش بالایی آن از سنگ‌های سیاه تا خاکستری تیره و گاهی سنگ آهک مرجانی پدید آمده است.

۲-۵-۱- مزوزوئیک (تریاس) - واحد TR_{sh}^d (سازند شتری)

مهمترین سازند در محدوده مورد مطالعاتی، سازند شتری (واحد TR_{sh}^d) است که در غرب آبخوان ابرکوه در قسمت‌هایی که سازند آهکی تریاس رخنمون دارد، منشأ و عمدتاً محل ورودی جریان آب زیرزمینی است (شکل‌های ۱-۴ و ۱-۶). سنگ‌های این سازند تماماً دولومیتی بوده با لایه‌بندی خوب

و در اکثر رخنمون‌ها با ضخامتی متجاوز از ۵۰۰ متر به رنگ خاکستری سفید و خاکستری تیره است. این دولومیت به طور تدریجی با واحد TR^1 ، سنگ آهک مارنی همراه با میان‌لایه‌های شیل همبری دارد. در این دولومیت‌ها آثار فسیلی وجود ندارد و بنا به موقعیت چینه‌شناسی سن آنها تریاس میانی است (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱).



شکل ۱-۴ نمایی از سازند شتری در غرب فراغه (ابركوه)، (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱)

۱-۵-۳- سنوزوئیک (واحدهای پلیوسن - کواترنر)

واحد کنگلومرای PI از واحدهای تخریبی پلیوسن - کواترنر است (شکل ۱-۶) که بخش‌های مرکزی، شرق و شمال شرقی محدوده آبخوان را شامل می‌شود. این واحد پادگانه‌های بلندی به ضخامت نه-چندان زیاد را تشکیل داده است و در بیشتر مکان‌ها مارن‌های ژئوپس‌دار و ژئوپس بخش بالایی واحد OM را پوشانده است. این کنگلومرا به علت وجود خمیره رسی همراه با گچ (با ضخامت ۲ تا ۳ متر) تا اندازه‌ای سست می‌باشد و سن آن پلیوسن است.

مهمترین واحدهای کواترنری محدوده آبخوان ابرکوه (شکل ۱-۶) به صورت آبرفت‌های قدیمی و پادگانه‌های بلند کوه‌پایه‌ای Q^{t1} که مرتباً در حال فرسایش هستند و عناصر تشکیل دهنده آن بیشتر دانه‌های نیمه‌گرد تا گرد شده با خمیره‌ای نه چندان سخت می‌باشند. پادگانه آبرفتی جدید و جوان دشت با ارتفاع متوسط (Q^{t2}) که در برگیرنده مواد آواری سخت نشده یا کمی سخت که از فرسایش

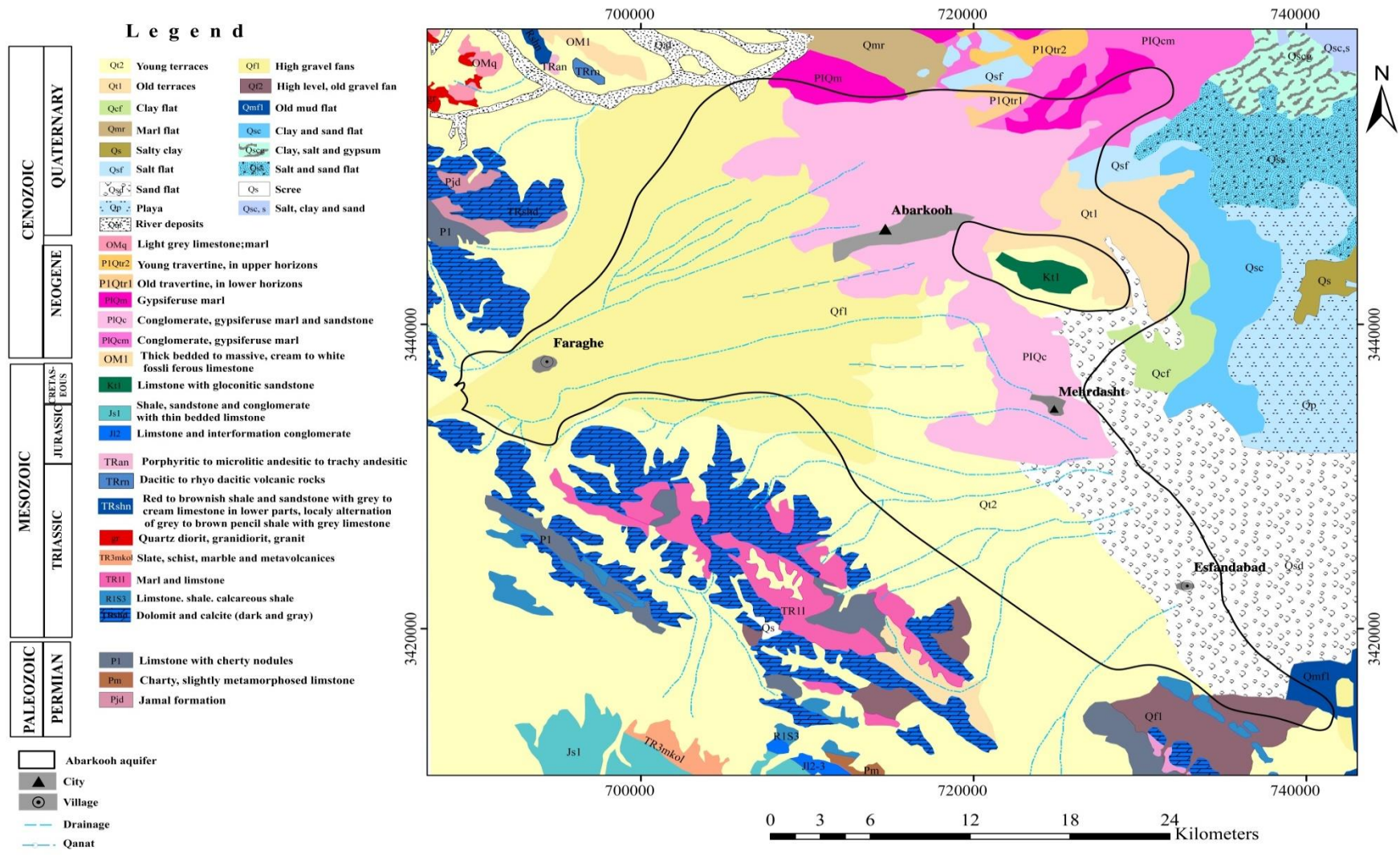
سنگ‌های قدیمی‌تر تشکیل شده‌اند. رسوبات کویری و سیلابی دانه‌ریز (Q^{sd} ، Q^{sf} و Q^m) که از کوه-ستان‌ها به سوی بخش‌های پایین‌تر جریان یافته و نهشته‌های ریزدانه را بر جای گذاشته‌اند. این رسوبات به صورت کفه‌های گلی و نمکی (شکل ۱-۵) با سن کواترنری در بخش‌های شرقی آبخوان و محدوده روستای اسفندآباد دیده می‌شوند.



شکل ۱-۵ رسوبات کویری و سیلابی دانه ریز (کفه‌های گلی و نمکی) شمال روستای اسفندآباد (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱)

محدوده دهستان فراغه، دره انتهای غرب محدوده آبخوان واحد Q^{f1} با ارتفاع ۱۷۰۰ متر تا ۱۵۰۰ متر مرکز آبخوان انباشته‌های مخروط افکنه‌های کهن و جوان که هنگام کاهش ناگهانی قدرت حمل رودخانه در جای پیوستن دره‌ها به دشت تشکیل می‌شوند و شامل رسوبات سیلتی، ماسه‌ای و قلوه سنگی هستند که از سمت کوهستان به سمت دشت از اندازه آنها کاسته می‌شود (شکل ۱-۶). در محدوده شهرستان ابرکوه و بخش مرکزی آبخوان دشت واحدهای تخریبی پلیوسن - کواترنر بخش گسترده شرقی آبخوان (مهردشت) را پوشانده است. واحد PIQ^c تناوبی از لایه‌های نیمه‌سخت کنگلومرای تا سست خاکستری روشن تشکیل شده است که دارای قطعات با گردشگی و جورشدگی متوسط از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر هستند. رخنمون گسترده این واحد با شیب کم ۵ تا ۱۰ درجه در گستره بزرگی از بخش مرکزی دشت و شمال شرقی آن با پادگانه‌های بلند با ضخامت نه

چندان زیاد است. در این واحد میان لایه‌هایی از مارن‌های گچ‌دار و ماسه سنگ‌های زرد رنگ تا خاکستری روشن وجود دارد. در مناطق شمال و شمال غربی شهر ابرکوه مارن‌های گچ‌دار قرمز، کرم و سبز هستند که به صورت هم شیب و تدریجی بر روی واحد مذکور قرار گرفته است. در جنوب شهر ابرکوه و بخش‌های مرکزی آبخوان و جنوب آن در محدوده دهستان مهرآباد و شهر مهردشت واحد Q^{t2} وجود دارد، انباشت‌هایی از کنگلومرای سخت نشده به شکل مخروط افکنه و دشتهای آبرفتی کم ارتفاع، با عناصری درشت و آزاد تشکیل شده است که از لحاظ شرایط مناسب خاک کشاورزی دارای اهمیت می‌باشد (شکل ۱-۶). در محدوده جنوب و جنوب شرق آبخوان حد فاصل مهردشت و اسفندآباد و جنوب آن که در شرق این محدوده کفه و فروافتادگی ابرکوه (پهنه نمکی - پلایا) وجود دارد، دو واحد Q^M (Q^{sd}) و Q^{t2} دیده می‌شود. واحد Q^M شامل کفه گلی (ماسه‌ای - نمکی) است که از رواناب‌های جریان یافته از ارتفاعات به بخش‌های پایین‌تر با تشکیل نهشته‌های ریزدانه در نواحی پست‌تر به همراه کفه‌های نمکی و دریاچه بوجود آمده‌اند (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱).



شکل ۱-۶ نقشه زمین‌شناسی محدوده آبخوان دشت ابرکوه

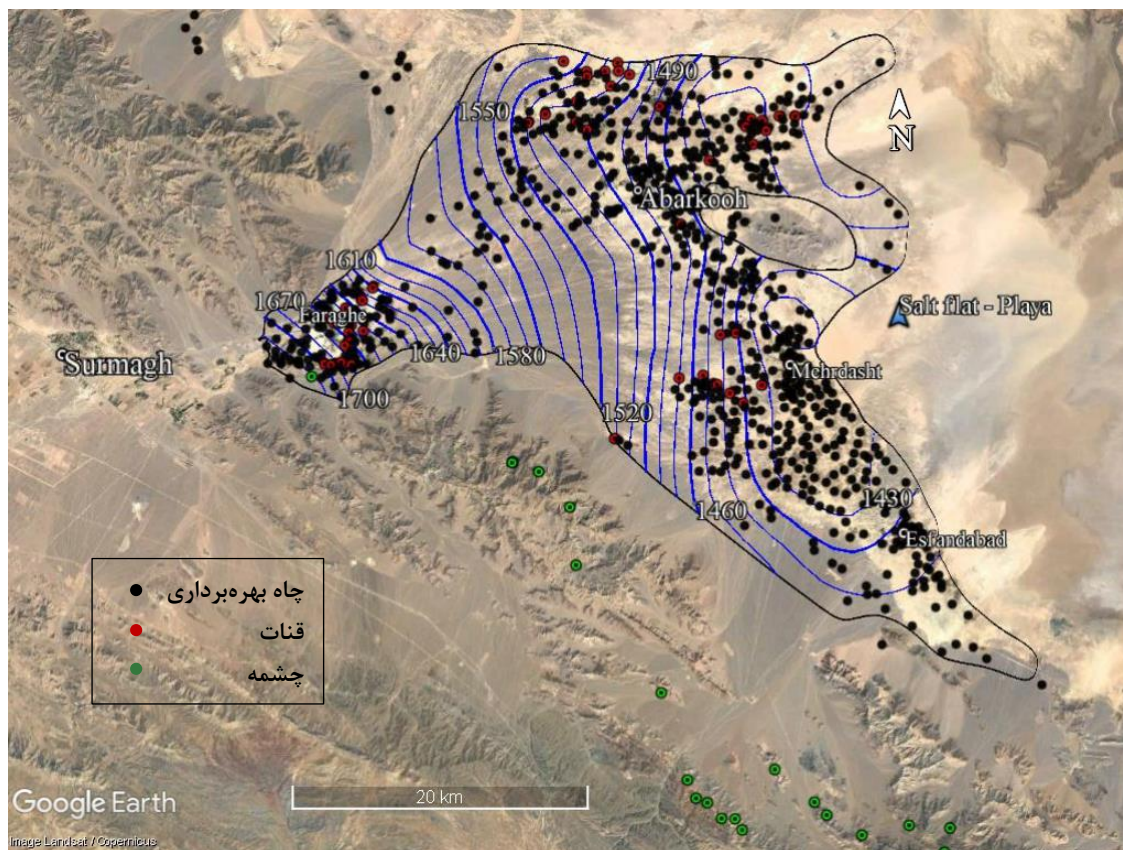
۱-۶- هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

بر اساس آخرین مطالعات و آماربرداری منابع آب ۱۳۸۹-۱۳۸۸، در محدوده آبخوان ابرکوه ۷۳۰ حلقه چاه بهره‌برداری و ۳۰ قنات دایر و یک چشمه وجود دارد که حجم تخلیه سالانه از این آبخوان آبرفتی ۱۷۸ میلیون مترمکعب بوده است (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱). در شکل ۱-۷ موقعیت و پراکندگی منابع آبی آبخوان شامل چاه‌های بهره‌برداری، قنات و چشمه در محدوده آبخوان نشان داده شده است (شرکت آب منطقه‌ای یزد، ۱۳۹۵). با توجه به هیدروگراف واحد دشت (شکل ۱-۸)، در طول دوره ۹ ساله (از مهر ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۹۰) سطح آب آبخوان به میزان ۵/۱ متر افت داشته است که متوسط افت سالانه در طول این دوره حدود ۰/۶ متر می‌باشد. از عوامل تأثیرگذار بر سیر نزولی هیدروگراف یعنی افت سطح آبخوان، می‌توان به کاهش بارندگی و تخلیه بیش از حد آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری اشاره نمود. مطالعات انجام شده به منظور بررسی بیلان آبخوان ابرکوه و تغییرات حجم مخزن آبخوان با استفاده از هیدروگراف واحد مذکور نشان می‌دهد که این تغییر برابر ۲۸- میلیون مترمکعب است. به نظر می‌رسد همچنان این روند افت سطح آبخوان وجود دارد و خطوط هم‌پتانسیل شکل ۱-۷ در وضعیت حداکثر تراز سطح ایستابی در فروردین ۱۳۹۴ در منطقه مهردشت، ایجاد مخروط افت (منحنی‌های بسته در نقشه هم‌پتانسیل) را نشان می‌دهد.

شکل و کشیدگی آبخوان دشت ابرکوه به پیروی از امتداد ارتفاعات غرب و جنوب غرب، شمال غرب - جنوب شرق و هم‌مرز با پایاب حوضه (کفه ابرکوه) است (شکل ۱-۷). این آبخوان از نوع آبخوان آزاد^۱ می‌باشد. در قسمت‌هایی از محدوده شهر ابرکوه به سمت شرق دشت، آبخوان از نظر کیفیت آب دو لایه است و آب در سفره رویی با ضخامت حدود ۲۰۰ متر شیرین و در سفره زیرین آب شور تا عمق ۳۰۰ متر ادامه دارد. در جنوب و جنوب شرقی آبخوان در منطقه اسفند آباد (شکل ۱-۷)، آبخوان دو لایه می‌باشد و سفره آب شیرین در لایه رویی با ضخامت کم و لایه زیرین آب با ضخامت زیاد، شور

¹ Unconfined

می‌باشد که در اثر اضافه برداشت از آب شیرین لایه رویی، آب برخی از چاه‌های بهره‌برداری شور و بعضاً متروکه شده‌اند (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱).



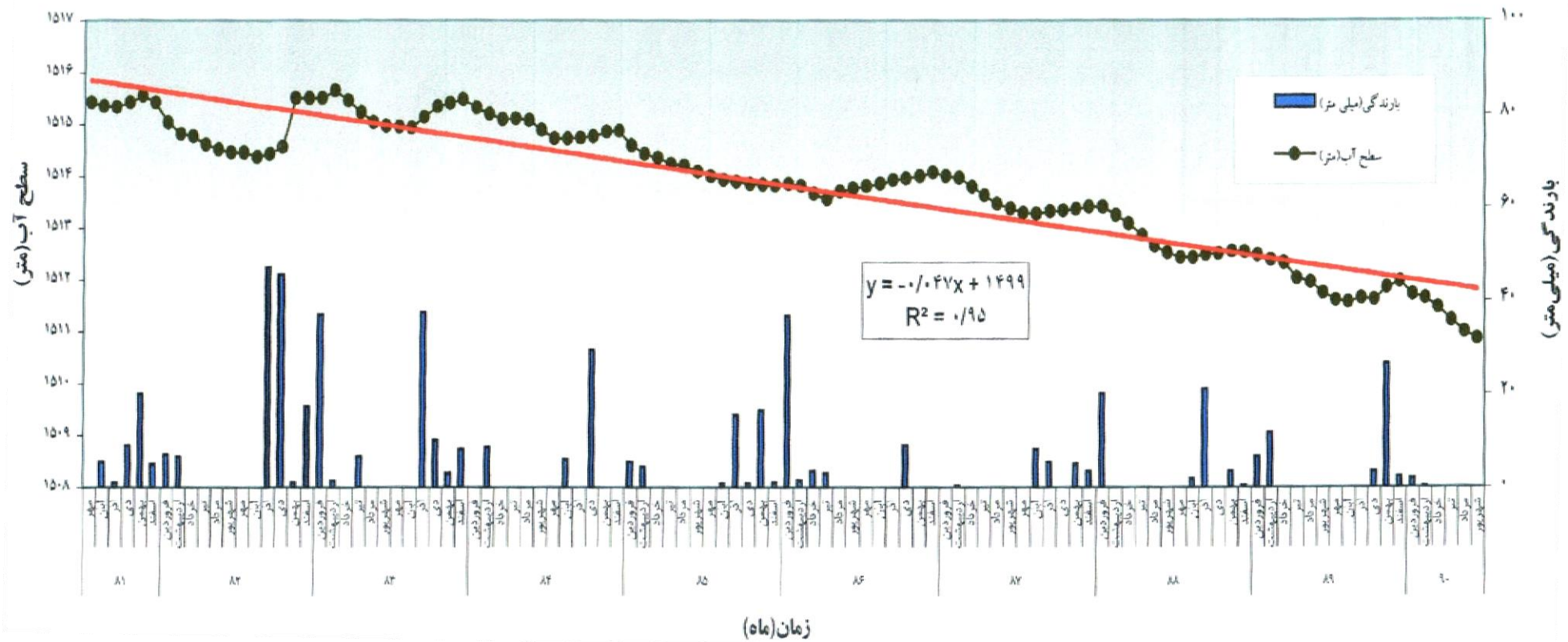
شکل ۱-۷ موقعیت و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری، قنات و چشمه در محدوده آبخوان ابرکوه (حداکثر تراز سطح ایستابی در فروردین ۱۳۹۴)

تشکیل آبخوان ابرکوه بر اساس رخدادهای زمین‌شناسی است، با توجه به این که در ارتفاعات غربی آبخوان رسوبات کرتاسه بالایی و پالئوژن دیده نمی‌شود و از لحاظ تکتونیکی مربوط به آخرین مراحل کوهزایی آلپی بعد از پلیوسن می‌باشد، بنابراین آبرفت حاصل از تشکیلات کربناته غرب منطقه از کرتاسه بالایی به بعد (شکل ۱-۶) در دامنه ارتفاعات به طرف دشت گسترش یافته و این آبرفت، سفره آب زیرزمینی را تشکیل داده است که در بخش جنوبی دشت آبخوان عمومیت داشته و در منطقه اسفندآباد تا مهردشت سفره یکنواخت را به وجود آورده است. بنابراین از ارتفاعات به طرف

دشت، آبرفت دانه ریزتر شده و در حواشی کفه ابرکوه به رسوبات نرم حاوی آب شور و نهایتاً کفه‌های نمکی تبدیل شده است (شکل ۱-۵).

با توجه به مطالعات انجام شده توسط شرکت مهندسين مشاور پورآب (۱۳۹۱)، منبع تغذیه دشت (آبخوان) از ارتفاعات سازندهای آهکی تریاس در غرب (شکل ۱-۶) می‌باشد. جهت جریان آب زیرزمینی در دشت از سمت نواحی شمالی، شمال غرب، غرب و همچنین شرق دشت به سمت مرکز می‌باشد. جهت جریان در دهه ۷۰ (آذر ماه ۱۳۷۶) از سمت شمال، شمال غرب و غرب به سمت شرق دشت و کویر ابرکوه بوده، اما در دهه ۸۰ (مهر ماه ۱۳۸۱ تا شهریور ماه ۱۳۹۰) با توجه به کاهش بارندگی (تغذیه) و افزایش بهره‌برداری از سمت کویر ابرکوه به سمت آبخوان است. مهمترین رودخانه در این محدوده رودخانه گاشار در غرب آبخوان (شکل ۱-۶) است که در بیشتر ماه‌های سال خشک می‌باشد و در ماه‌های دارای بارندگی، آبدهی دارد. با احداث بندهای تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در محدوده گاشار و دهستان فراغه باعث تغذیه این آبخوان شده است.

جنس سنگ کف آبخوان ابرکوه در حاشیه ارتفاعات شمالی عمدتاً مارن، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آهک‌های مرجانی الیگومیوسن، در حاشیه ارتفاعات غربی آهک‌ها و دولومیت‌های تریاس، در حاشیه ارتفاعات جنوب غرب سنگ آهک‌های خاکستری رنگ پرمین، شیل، کنگلومرا و آهک‌های شیلی تریاس و بالاخره در حاشیه شرقی دشت کفه‌های گلی و نمکی (رسوبات ریزدانه حاوی املاح گچ و نمک) می‌باشد (مهندسين مشاور پورآب، ۱۳۹۱).



شکل ۸-۱ هیدروگراف واحد دشت ابرکوه در بازه زمانی مهر ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۹۰ (مهندسين مشاور پورآب، ۱۳۹۱)

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۲- مبانی نظری و علمی پژوهش

۱-۱-۲- بررسی مهمترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی

عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و در نهایت تخریب زیست‌محیطی آن شامل عوامل و آلاینده‌های طبیعی یا زمین‌زاد^۱ و عوامل و آلاینده‌های غیر طبیعی یا انسان‌زاد^۲ می‌باشند که بر کیفیت (هیدروژئوشیمی) آب‌های زیرزمینی (آبخوان‌ها) اثرگذار هستند. تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند ناشی از تغییر کیفیت بارش نفوذی، واکنش آب‌های زیرزمینی با محیط، طول مسیر جریان، مدت زمان ماندگاری آب، نوع گیاهان محلی و جذب گازهای مختلف باشد (شمسایی، ۱۳۹۱). با مطالعه این عوامل و سپس تعیین شاخص‌های کیفی که بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی آب و محیط پیرامون آن است، می‌توان کیفیت آینده آبخوان را در مقایسه با کیفیت فعلی و شدت تخریب کیفی آن را پیش‌بینی نمود و با تعیین نوع و میزان مصرف آب در بهره‌برداری بهینه از آبخوان‌ها و حفظ و صیانت از آنها، برنامه‌ریزی کرد. بررسی هیدروژئوشیمیایی یک آبخوان یعنی بررسی تکامل هیدروژئوشیمیایی آن بسته به میزان زمان ماندگاری یا اقامت آب زیرزمینی در تماس و واکنش با سنگها و رسوبات یا میزان سرعت عبور و مهاجرت آب زیرزمینی از مواد زمین می‌باشد. هرچه این سرعت کمتر باشد، زمان ماندگاری بیشتر و تکامل هیدروژئوشیمیایی بهتری رخ داده است.

مهمترین عوامل انسان‌زاد مانند فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، معدنی و شهری، و مهمترین عوامل طبیعی اثرگذار بر کیفیت یک آبخوان که همان آب‌زیرزمینی قابل بهره‌برداری است، شامل تغذیه، تخلیه، حضور منابع آلاینده طبیعی، ویژگی‌های آبخوان و عوامل دیگر می‌باشد.

الف - تغذیه طبیعی

در تغذیه طبیعی یک آبخوان دو عامل نقش مهم و قوی در کنترل کیفیت آب‌های زیرزمینی به ویژه آبخوان‌های آبرفتی دارد که عامل اول شامل نوع و محل تغذیه و عامل دوم، کمیت یا میزان تغذیه

¹ Geogenic

² Anthropogenic

می‌باشد. تغذیهٔ یک آبخوان می‌تواند از طریق جریان‌های زیرزمینی نزدیک به سطح زمین در امتداد سنگ‌های یکپارچه و نفوذناپذیر در یک حوضه آبریز یا از حوضهٔ آبریز مجاور رخ دهد. تغذیه می‌تواند از نفوذ از طریق کوه‌ها و ارتفاعات باشد که در اینجا تخلخل، درز و شکاف‌ها و شکستگی‌ها نقش مهمی در نفوذپذیری دارند و از طریق جریانهای سطحی و رواناب‌ها بر اساس شیب حوضهٔ آبریز انجام می‌شود. تغذیهٔ آبخوان از طریق نفوذ مستقیم بارش بر سطح یک آبخوان در یک حوضهٔ آبریز انجام می‌شود و بستگی به شدت بارندگی و نفوذ پذیری زمین دارد (Thiros et al. 2010).

ب- تخلیهٔ طبیعی

در تخلیهٔ طبیعی یک آبخوان آنچه بر کیفیت آب زیرزمینی اثرگذار است و نقش مهمی دارد، نوع و محل تخلیه است، یکی از راه‌های تخلیهٔ طبیعی آب زیرزمینی تبخیر و تعرق است که توسط خاکها و گیاهان صورت می‌گیرد. آبهای زیرزمینی کم عمق و نزدیک به سطح زمین از طریق منطقهٔ هواده خاکها تبخیر می‌شوند و از این طریق املاح خود را برجای می‌گذارند. گیاهان هم با جذب آب و تبخیر و تعرق آنرا تخلیه می‌نمایند. غلظت املاح در آب‌هایی که از منطقهٔ ریشه گیاهان عبور می‌کنند معمولاً افزایش می‌یابد که این افزایش بیشتر مربوط به فرایند تبخیر و تعرق است. جذب انتخابی املاح توسط گیاهان نیز در تغییر غلظت املاح آب‌های نفوذی مؤثرند. جریان‌های خروجی نزدیک به سطح زمین که نقش تخلیهٔ یک آبخوان یا حوضهٔ آبریز را به عهده دارند. این جریان‌ها می‌توانند به صورت چشمه در سطح زمین خارج شوند. منشأ تغذیه خیلی از رودها و نهرها، منابع آب زیرزمینی هستند که آب خود را با توجه به شرایط زمین شناسی محل به سطح زمین و به درون نهرها و رودها تخلیه می‌نمایند (Thiros et al. 2010).

ج- حضور منابع آلایندهٔ طبیعی

کیفیت آب زیرزمینی به حضور منابع آلایندهٔ طبیعی یعنی زمین شناسی حوضهٔ آبریز از جمله مواد تشکیل دهندهٔ زمین شامل سنگ بستر حوضه، رسوبات و نهشته‌های آن که آب با آن در تماس است، فرآیندها و واکنش‌هایی که از زمان تغذیه تا تخلیهٔ آب در حوضهٔ آبریز در مسیر خود رخ می‌دهد و

معمولاً منجر به افزایش املاح آب می‌گردد به نوع و ترکیب خاک‌ها، سنگ‌ها، رسوبات و نهشته‌های حوضه بستگی دارد. همچنین وجود گسل در هدایت، مهاجرت و مسافت طی شده نسبت به زمان تماس آب با مواد تشکیل دهنده حوضه آبریز می‌باشد. وجود گسل‌های اصلی و پیرو آن گسل‌های فرعی و شکستگی‌های پیرامون آن نقش نقل و انتقال آب در تغذیه و تخلیه آبخوان در مسیرهای ترجیحی و از پیش تعیین شده دارند (Gannon et al. 2011).

د- ویژگی‌های آبخوان

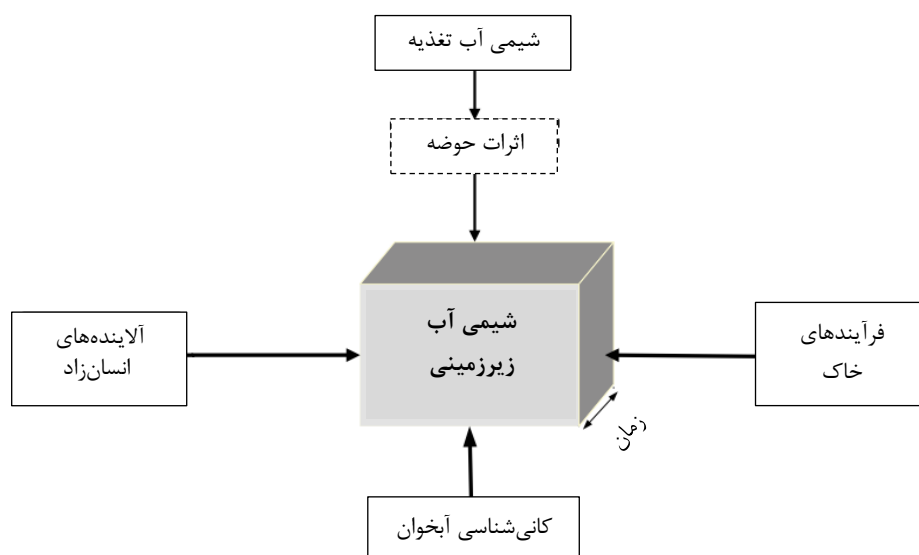
عامل طبیعی و مهم دیگری که بر کیفیت آب‌های زیرزمینی مؤثر است، ویژگی‌ها و مشخصات آبخوان‌ها می‌باشد. هدایت هیدرولیکی حالت اشباع میزان توان جابجایی آب در حالتی که محیط اشباع است را نشان می‌دهد. کیفیت آب نقش بسیار مهمی در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیک اشباع خاک دارد. اثر کیفیت آب بر هدایت هیدرولیک اشباع خاک، به علت تغییراتی است که املاح در ساختمان خاک می‌دهند. بنابراین هدایت هیدرولیکی عبارت است از سرعت حرکت آب در داخل محیط متخلخل و تابعی از خصوصیات ذرات خاک و یا سنگ و خصوصیات مایع می‌باشد. (دفتر استانداردها و معیارهای فنی، ۱۳۸۴). هدایت هیدرولیکی و گرادیان آن نقش مهمی در تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها و کیفیت آنها دارند.

رس‌ها دارای تخلخل زیادی هستند و در نتیجه سطح تماس آب با سنگ‌ها و خاک‌های حاوی رس می‌تواند زیاد باشد. از طرفی تراوایی رس‌ها خیلی کم و ناچیز بوده و سرعت حرکت آب در لایه‌های رسی بسیار کم و حتی توقف آب در آنها زیاد و ساکن می‌باشد. بنابراین زمان لازم برای واکنش بین آب و رس‌ها افزایش یافته و غلظت املاح (کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول) در آب تغییر می‌کند. معمولاً غلظت املاح آب‌های زیرزمینی در مجاورت رس‌ها افزایش می‌یابد. مثلاً در تشکیلات مارنی و رسی میزان سولفات و کلر بالاست، سولفات‌ها به صورت سولفات کلسیم و سولفات منیزیم و کلورها به صورت کلور سدیم هستند (شمسایی، ۱۳۹۱). بعضاً لایه‌ها و عدسی‌های رسی، لایه‌های آبدار را در

خود حبس و یا تله می‌اندازند و ارتباط بخش‌هایی از یک آبخوان با قسمت‌های دیگر آن قطع می‌شود و معمولاً کیفیت و غلظت املاح آب هم تغییر می‌کند.

منطقه غیر اشباع از این جهت که خصوصیات میرایی مواد تشکیل دهنده منطقه مواد خاک و سنگ- های بالای سطح ایستابی را مشخص می‌کند، شاخص مهمی در تعیین کیفیت و آسیب‌پذیری آبخوان به شمار می‌رود. عواملی که در منطقه غیر اشباع مورد توجه قرار می‌گیرد شامل ضخامت منطقه غیر اشباع یا عمق سطح آب زیرزمینی، تراوایی خاک، ظرفیت میرایی خاک، شکستگی‌های زمین و ترکیب شیمیایی مواد تشکیل دهنده است. اثر منطقه غیر اشباع با ترکیب نفوذپذیری و عمق سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شود (خلقی و تاکی، ۱۳۸۲).

از ویژگی‌های دیگر یک آبخوان، شیمی یا هیدروشیمی آن از جمله pH، اکسیداسیون و احیای آن است که متأثر از شیمی آب تغذیه، اثرات حوضه آبریز، فرایندهای خاک، کانی شناسی و زمان ماندگاری آبخوان و عامل غیر طبیعی دیگر آلاینده‌های انسان‌زاد می‌باشد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ عوامل مؤثر بر شیمی آب زیرزمینی (Davidson and Wilson 2011)

ه- عوامل طبیعی دیگر

عوامل طبیعی مهم و مؤثر دیگری که در کیفیت آبخوان‌ها یا آب‌های زیرزمینی نقش دارند و ذکر نشد شامل سن آب زیرزمینی و نوع سیستم جریان حوضه (باز یا بسته) است. عامل زمان که همان زمان ماندگاری آب یا میزان سرعت حرکت یا مهاجرت آب را نشان می‌دهد، تعیین‌کننده میزان واکنش آب با محیط پیرامون خود و یا تکامل هیدروژئوشیمیایی آب می‌باشد. هرچه زمان ماندگاری آب در آبخوان افزایش و سرعت مهاجرت آن کاهش یابد، سن آب افزایش و از لحاظ هیدروژئوشیمی تکامل می‌یابد که در این راستا غلظت املاح آب و قدرت یونی آن بالا می‌رود. در یک حوضه آبریز به جایی که رواناب‌های سطحی هدایت می‌شوند، نقطه تمرکز آن حوضه می‌گویند. نقطه تمرکز در یک حوضه آبریز اساس بسیاری از محاسبات و برداشتها نسبت به آن است. مثلاً اگر حوضه آبریز دارای نقطه تمرکز خارج از خود حوضه باشد، حوضه باز نامیده می‌شود و اگر نقطه تمرکز در داخل حوضه باشد، حوضه بسته نامیده می‌شود. حوضه‌های آبریز کویری معمولاً حوضه‌های بسته هستند، زیرا پایاب رواناب‌های سطحی را در خود دارند. در حوضه‌های بسته تبادل کمتری با خارج آن وجود دارد و تمرکز رواناب‌ها نقش تغذیه آبخوان‌های کم عمق با میزان املاح بالا را دارند و هرچه به پایاب حوضه نزدیک شویم آب زیرزمینی دارای املاح و شوری بیشتر و نامتعارف‌تر خواهد شد.

و- عوامل انسان‌زاد (فعالیت‌های کشاورزی)

از عوامل انسان‌زاد آلوده‌کننده آب، عامل کشاورزی بیشتر مورد توجه است. با رشد جوامع انسانی فعالیت‌های کشاورزی نیز در حال افزایش است و باعث کاهش کیفیت آب می‌شود. این آلودگی از طریق رسوبات، آفت‌کش‌ها، فضولات حیوانی، کودها و مواد آلی و معدنی وارد آب می‌شوند. کشاورزی اثرات مستقیم و غیر مستقیم روی نرخ و ترکیب تغذیه آب‌های زیرزمینی و بیوژئوشیمی آبخوان دارد. اثرات مستقیم شامل حل و حمل و نقل مقادیر بیش از حد کود و مواد مرتبط با تغییرات

هیدرولوژیکی، آبیاری و زهکشی و برخی از اثرات غیر مستقیم شامل تغییرات در واکنش آب - سنگ در خاک و سفره‌های آب ناشی از افزایش غلظت اکسید محلول می‌باشد (Bohlke 2002).

۲-۱-۲- نقش پلایا و کانی‌های تبخیری در کیفیت آبخوان‌ها

یکی از مهمترین منابع آلاینده طبیعی از عوامل تأثیرگذار بر آبخوان‌ها، ترکیب سنگ‌ها، رسوبات و نهشته‌های حوضه آبریز آبخوان است که در این بین به ویژه در مناطق گرم و خشک و کویری، نقش پلایا و کانی‌های تبخیری در کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. برخی از کانیهای موجود در رسوبات تبخیری و شورابه‌ها شامل ژیپس، کلسیت، هالیت، سیلین، تناردیت، اولکسیت و مونت موریلونیت هستند که بعضاً ارزش اقتصادی دارند. جهت بررسی دقیق نوع و میزان اثرات پلایا و رسوبات تبخیری بر کیفیت منابع آب زیرزمینی بایستی، اولاً ارتباط ژنتیکی رسوبات تبخیری با سنگهای اطراف حوضه آبریز آبخوان یا حوضه مجاور آن را تعیین نمود، ثانیاً جهت تعیین و پیش بینی میزان اثرگذاری پلایا به تفکیک زیر محیط‌های گوناگون پلایا را بررسی نمود که به شرح زیر این زیر محیط‌ها به ۵ زیر محیط به ترتیب از بیرون به داخل تقسیم می‌شوند (رضائیان، ۱۳۹۱).

الف- زیر محیط رودخانه فصلی خشک

رودخانه‌های فصلی در بخشی از سال در مواقع بارندگی بهار و زمستان دارای آب بوده و در بیشتر طول سال خشک می‌باشد و معمولاً جریان آنها بیش از چند روز دوام نمی‌آورد. این رودخانه‌ها از اطراف حوضه وارد حوضه آبریز شده و با توجه به وسعت حوضه، آبدهی متفاوت دارند و تغذیه کننده شورابه‌ها و دریاچه‌های فصلی بخش پایاب حوضه‌های کویری می‌باشند.

ب- زیر محیط باد بزن آبرفتی

بادبزن‌ها - مخروط افکنه‌ها دارای رسوبات درشت دانه با فرم هندسی مخروطی شکل هستند که رأس مخروط به طرف ارتفاعات و قاعده آن به سمت دشت می‌باشد. اندازه ذرات رسوبات در نزدیکی ارتفاعات درشت‌تر و به سمت دشت ریزتر می‌شوند.

ج- زیر محیط پهنه گلی خشک

پهنه گلی خشک جایی تشکیل می‌شود که شیب حوضه به شدت کاهش یافته و انرژی آب کم شده و قبل از آن رسوبات آواری درشت دانه ته‌نشین شده‌اند. رسوبات این بخش ریزدانه و در مواقع خشک بودن حوضه، ترک‌های گلی در آن دیده می‌شود و معمولاً در اطراف بخش آبدار حوضه تشکیل می‌شوند. سطح آب زیرزمینی در این پهنه عمیق بوده و نقشی مهمی در ایجاد کانی‌ها و رسوبات تبخیری ندارد.

د- زیر محیط پهنه گلی شور

پهنه‌های گلی شور در حاشیه دریاچه‌های شور دائمی یا فصلی تشکیل می‌شوند. این زیر محیط در برگیرنده رسوبات رسی دانه‌ریز است. این پهنه‌ها دارای کانی‌های تبخیری حاصل از آب‌های زیرزمینی می‌باشند. در پهنه‌های گلی شور فرآیندهای رودخانه‌ای، دریاچه‌ای و بادی و به مقدار کمتر شورابه‌های زیرزمینی، کنترل کننده اصلی رسوب گذاری هستند. سطح آب زیرزمینی در این زیر محیط نزدیک به سطح زمین می‌باشد.

ه- زیر محیط پهنه شور

بخش مرکزی پلایا که پست‌ترین بخش نیز است، زیرمحیط پهنه شور را تشکیل می‌دهد. به علت وسعت زیاد و شیب کم حوضه، عمق آب در این پهنه کم می‌باشد و در نتیجه میزان تبخیر زیاد بوده و در مواقع خشکی پوشیده از لایه‌های تبخیری است.

۲-۲- مروری بر تحقیقات پیشین در ایران

مرور نتایج مطالعات و تحقیقات گذشته در ایران در خصوص موضوع این تحقیق که هیدروژئوشیمی زیست محیطی آبخوان دشت ابرکوه است، در دو بخش شامل منطقه مورد مطالعه و روش تحقیق انجام شد. ابتدا در ذیل مطالعات و تحقیقات مرتبط انجام شده روی دشت ابرکوه و سپس روش‌های تحقیق مرتبط با موضوع این تحقیق مرور می‌شود.

همچنین روزه و همکاران (۱۳۸۵) در تحلیل کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ابرکوه، تعداد ۲۸ نمونه (۲۱ حلقه چاه و ۷ رشته قنات) آنالیز کردند. در این تحقیق بیشترین غلظت مربوط به یون کلر عنوان شده که حکایت از کلروره بودن آب در دشت ابرکوه داشته است. از نظر تأثیر گسل‌ها روی کیفیت آب زیرزمینی بیان شده که دشت ابرکوه در بین دو سیستم گسلی بزرگ واقع شده است و اثر گسل روی کیفیت آب به طور مستقیم مشهود نمی‌باشد، ولی گسل دهشیر - بافت در شکل‌گیری تشکیلات نئوژن و تأثیر آن بر کیفیت آب دشت اهمیت دارد.

همچنین فاریابی و همکاران (۱۳۸۹) در ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت جیرفت با استفاده از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی بیان نموده است، دشت جیرفت دارای دو آبخوان تحت فشار و آزاد می‌باشد و آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعت است. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن می‌باشد. در این تحقیق از روش‌های آماری مانند تجزیه خوشه‌ای و ضرایب همبستگی و روش‌های هیدروشیمیایی مانند نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی استفاده شد. نمونه‌های آب در چهار گروه دسته‌بندی و آنالیز شدند و آبخوان هم از لحاظ کیفی به چهار زون متفاوت تقسیم شد. بر اساس نتایج حاصل، فرآیندهایی مانند انحلال ژپس، هالیت، سولفات‌های سدیم‌دار، هوازدگی پلازیوکلازهای غنی از سدیم و تبادل یونی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

در تحلیل‌های کمی و کیفی و پایش‌های انجام شده قبلی در خصوص آب زیرزمینی دشت ابرکوه می‌توان به نظری و همکاران (۱۳۹۰) در طراحی شبکه پایش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت ابرکوه اشاره نمود. در این تحقیق از تعداد ۶۴۶ حلقه چاه موجود در محدوده مطالعاتی، ۲۷ گروه و از هر گروه یک منبع شاخص ایجاد گردید. تیپ غالب آب زیرزمینی کلروه - سدیک می‌باشد که نشان از تأثیر کانی‌هالیت و کفه‌های نمکی در آبخوان دارند. در روش‌های آماری چند متغیره شامل تحلیل خوشه‌ای و مؤلفه‌های اصلی به منظور گروه‌بندی از نتایج آنالیز شیمیایی آخرین دوره آماربرداری به همراه نتایج منابع انتخابی کیفی موجود استفاده شده است.

بر اساس اطلاعات موجود در شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، مهمترین مطالعات انجام شده تاکنون روی آبخوان دشت ابرکوه، توسط شرکت مهندسی مشاور پورآب (آبان ماه ۱۳۹۱) تحت عنوان تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی ابرکوه بوده است. اهداف این مطالعه شناسایی مرزهای دشت از نظر نفوذ پذیری، تعیین عمق سنگ کف در نقاط مختلف دشت و شناسایی سازندهای زمین‌شناسی از لحاظ نفوذپذیری و تأثیر بر کیفیت آب، تهیه هیدروگراف واحد دشت، بررسی بیلان و محاسبه تغییرات حجم آبخوان می‌باشد. نتایج این مطالعه در تحقیق حاضر استفاده شده است.

نظر به مجاورت آبخوان ابرکوه در حاشیه کفه و پهنه نمکی ابرکوه و احتمالاً تأثیر کفه بر کیفیت آب، نتایج تحقیقات انجام شده روی پلایای ابرکوه مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیقات انجام شده توسط رضائیان (۱۳۹۱) در خصوص ارزیابی پتانسیل اقتصادی شورابه‌های پلایای ابرکوه، نشان داد که کانی‌هالیت بیشترین فراوانی را در بین کانی‌های تبخیری اصلی (ژیپس و کلسیت) در پلایا دارد. در این پلایا سولفات سدیم به همراه کانی‌هالیت به صورت تبخیری در سطح زمین متبلور می‌شوند. کانی‌های رسی و کوارتز دیگر کانی‌های همراه این نمک‌ها در پلایا به شمار می‌روند.

در مرور روش‌های تحقیق هیدروژئوشیمی زیست محیطی و ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی بر اساس تحلیل‌های آماری و هیدروشیمیایی می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط عبداللهی و همکاران (۱۳۹۴) تحت عنوان هیدروژئوشیمی زیست محیطی منابع آب زیرزمینی دشت راور اشاره نمود. یون‌های اصلی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی (به جز pH، بیکربنات و نیترات) از محل تغذیه به سمت تخلیه آبخوان و در جهت شیب هیدرولیکی افزایش یافته است. با توجه به تغییرات مکانی پارامترها و شاخص اشباع کانی‌های اصلی و محاسبه برخی نسبت‌های یونی فرایند تبخیر و به دنبال آن انحلال کانی‌های تبخیری، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده هیدروشیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت راور است. تیپ غالب آب کلروره و سولفات تعیین شد. منشأ فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی دشت راور، احتمالاً شیل‌های زغال‌دار در بستر آبخوان است. برخی منابع انسان‌زاد مانند فعالیت‌های شهرنشینی و آلودگی ناشی از جاده‌ها نیز احتمالاً منشأ برخی عناصر از جمله نیترات و سرب هستند. تحلیل آماری مؤلفه اصلی و آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی چند منشأ بودن یون‌های اصلی و فلزات سنگین در منابع آب را تأیید می‌کنند.

۲-۳- مروری بر تحقیقات پیشین خارجی

مرور تحقیقات انجام شده خارجی بیشتر جهت بررسی روش‌های تحقیقاتی در مناطق مشابه از جهان در خصوص ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی بوده است.

آکوستا و همکاران (Acosta et al. 2011) در تحقیقات خود نشان دادند که شوری باعث افزایش تحرک فلزات سنگین در خاک می‌شود. اثر شوری توسط ترکیبات کلریدهای کلسیم، منیزیم و سدیم و سولفات سدیم روی تحرک برخی از فلزات سنگین شامل مس، روی، کادمیم و سرب نشان داد که افزایش قدرت یونی توسط نمک‌های مذکور باعث آزاد شدن کادمیم بیشتر از سایر فلزات می‌گردد. حضور کلرید بیشتر از حضور سولفات، تحرک کادمیم و سرب را افزایش می‌دهد. ترکیبات کلروره، مهم‌ترین مکانیسم تحرک کادمیم و سرب هستند. سولفیدهای کادمیم در آب بسیار نامحلول هستند

و اثر شوری آب بر تحرک کادمیم زمانی که سولفیدها فراوان و در حال تشکیل هستند، کاهش می‌یابد. غلظت بالای سولفات در خاک موجب افزایش رسوب و کاهش تحرک فلزات می‌شود. مکانیسم اصلی تحرک سرب و کادمیم، رقابت با یون کلسیم در جذب سطحی خاک و تشکیل ترکیبات کلروره فلزی و همچنین سولفات‌های کادمیم و سرب در رقابت با یون منیزیم جهت آزادی سازی کادمیم و سرب می‌باشد.

تلیلی زلی و همکاران (Tlili-Zrelli et al. 2012) ارزیابی کیفی و ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی با روش‌های آماری چند متغیره و گرافیکی را در یک مطالعه موردی روی آبخوان شمال شرق تونس انجام دادند. آبخوان ساحلی گرومبالیا (Grombalia) جهت مصارف عمومی، کشاورزی و صنعتی بوده که بهره‌برداری بیش از حد، موجب تخریب آن شده است. در این مطالعه در راستای توسعه پایدار و با هدف شناسایی عوامل زمین‌زاد (طبیعی) و انسان‌زاد (غیرطبیعی) در فرآیندهای کنترل کننده کیفیت آبخوان، ۳۳ نمونه از چاه جهت ده پارامتر فیزیکوشیمیایی (درجه حرارت، هدایت الکتریکی، pH و یون‌های اصلی) آنالیز شدند. تیپ‌های غالب هیدروشیمیایی آب با استفاده از نمودار پایپر به صورت مخلوطی از تیپ Na-Cl-HCO_3 یا Na-Ca-Cl-SO_4 و با گسترش کمتر تیپ Na-Cl است. عامل اصلی کنترل ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی گرومبالیا انحلال کانی‌ها به ویژه کانی هالیت موجود در نهشته‌های سطحی است و عامل دیگر با اهمیت کمتر تبادل یونی مستقیم و معکوس با کانی‌های رسی موجود در آبخوان است. با مقایسه غلظت یون‌های اصلی با استانداردهای جهانی شرب و بهداشت، آبخوان جهت شرب بدون تصفیه مناسب نمی‌باشد.

کومه و همکاران (Kouamé et al. 2013) در خصوص خطرات آلودگی آب‌های زیرزمینی به وسیله فلزات سنگین از خاک‌های کشاورزی در منطقه سونگون (جنوب شرقی ساحل عاج) مطالعه کردند. دو تیپ خاک به صورت رس ماسه‌ای و ماسه رسی وجود دارد. فلزات سنگین سرب، مس، روی، آهن، کادمیم و کروم غلظت بسیار بالایی در خاک داشتند. شاخص‌های آلودگی یکپارچه (PLI) نشان داد

که بیش از ۷۰٪ خاک‌های کشاورزی سونگون آلوده به فلزات سنگین مذکور ناشی از کودها و آفت کش‌های کشاورزی بودند. خاک‌های منطقه سونگون خنثی و قلیایی بوده و دارای هدایت هیدرولیکی بالا و ویژگی برتر انتقال آلاینده می‌باشند. اقدامات لازم و مدیریت کشاورزی در مصرف کود و آفت کش مانع از آلودگی آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

مونکوودیول و همکاران (Montcoudiol et al. 2014)، هدف از مطالعه ژئوشیمی آب‌های زیرزمینی منطقه اوتاویوآیس (Outaouais) از استان کبک (Quebec) در کشور کانادا را شناسایی فرآیندهای اصلی کیفیت آب‌های زیرزمینی و توسعه یک مدل مفهومی برای جریان آب‌های زیرزمینی و تکامل ژئوشیمیایی آن بیان نمودند. منابع آب زیرزمینی در این منطقه جهت شرب، صنعت و کشاورزی مصرف می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که هجوم آب شور دریا، تبادل یونی و تغذیه آب شیرین مهمترین فرآیند تأثیرگذار بر شیمی آب زیرزمینی در این منطقه است. فرآیندهای ثانویه مربوط به زمین‌شناسی سنگ بستر آبخوان می‌باشد که باعث افزایش فلورید، اورانیم، آهن و منگز بیش از حد استانداردهای آب آشامدنی کانادا شده است. در این تحقیق از ۱۳۹ چاه نمونه‌برداری و جهت یون‌های اصلی، عناصر نادر و مواد مغذی و سولفیدها آنالیز شدند. در تحلیل‌های آماری و هیدروشیمیایی نمونه‌ها از روش‌های آماری چند متغیره مانند تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی و فاکتور (FA و HCA) استفاده شده است.

زایدی و همکاران (Zaidi et al. 2015) مطالعه موردی را در شمال غرب عربستان سعودی با موضوع تبادل یونی معکوس به عنوان فرآیند عمده کنترل کننده ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی در محیط خشک را انجام دادند. در این مطالعه ۶۰ نمونه آب زیرزمینی از مزارع کشاورزی در سه منطقه جهت آنالیز یون‌های اصلی، یون نیترات، یون فلورید و دیگر پارامترهای فیزیکوشیمیایی جمع آوری شد. تیپ‌های هیدروشیمیایی محدوده‌های آبخوان مورد مطالعه به صورت تیپ Ca-Cl، مخلوط تیپ Ca-Mg-Cl و تیپ Na-Cl می‌باشد. فرآیندهای تبخیر و تبادل یونی معکوس کنترل کننده ترکیب

شیمیایی آبخوان است، به طوری که فرآیند تبادل یونی معکوس غالب می‌باشد. محاسبه نسبت‌های یونی و رسم نمودارهای آنها نشان می‌دهد که تبادل یونی معکوس بین یون سدیم در آب و کلسیم و منیزیم در سطح رس‌ها انجام شده است. منشأ یون فلورید احتمالاً زمین‌زاد است و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. منشأ یون نیترات در استفاده از کودهای کشاورزی است، با توجه به این که غلظت یون نیترات در تمام نمونه‌ها کمتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. در این مطالعه ضمن تحقیق روی کیفیت آبخوان جهت آبیاری و کشاورزی توصیه شده که برای حداکثر بهره‌وری از محصولات مقاوم در برابر شوری استفاده شود.

محمد و همکاران (Mohamed et al. 2016) در ارزیابی هیدروشیمی کیفیت آب زیرزمینی در امارات متحده عربی بیان کردند که آب‌های زیرزمینی آبخوان آبرفتی در مجاورت شهر العین منبع اصلی آبیاری بوده و فعالیت‌های شهرنشینی و کشاورزی منبع احتمالی آلودگی آب است. بنابراین ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی جهت جلوگیری از آلودگی و مدیریت مؤثر آن بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق ۲۸ نمونه از آب چاه جهت آنالیز یون‌های اصلی و نیترات برداشت شد. نتایج نشان دادند که مهمترین کنترل کننده ترکیب شیمی آب زیرزمینی شامل تبخیر، انحلال کانی‌های سلیکاته و تبخیری، تبادل کاتیونی و مخلوط شدن با آبخوان آهکی است. افزایش غلظت یون‌های کلرید، سدیم و سولفات (تیپ غالب Na-Cl-SO_4) و کل جامدات محلول (TDS) در آب به علت تبخیر در مناطق کم عمق آب زیرزمینی می‌باشد.

فصل سوم

روش انجام کار

۳-۱- مقدمه

در این فصل جهت بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی زیست‌محیطی آبخوان دشت ابرکوه، به طور مختصر کلیه اقدامات و روش‌های تحقیقاتی انجام شده، ارائه می‌شود. در این تحقیق اقدامات ذیل انجام شده است:

الف- جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های کمی و کیفی موجود در خصوص آبخوان دشت ابرکوه

ب- ترسیم نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

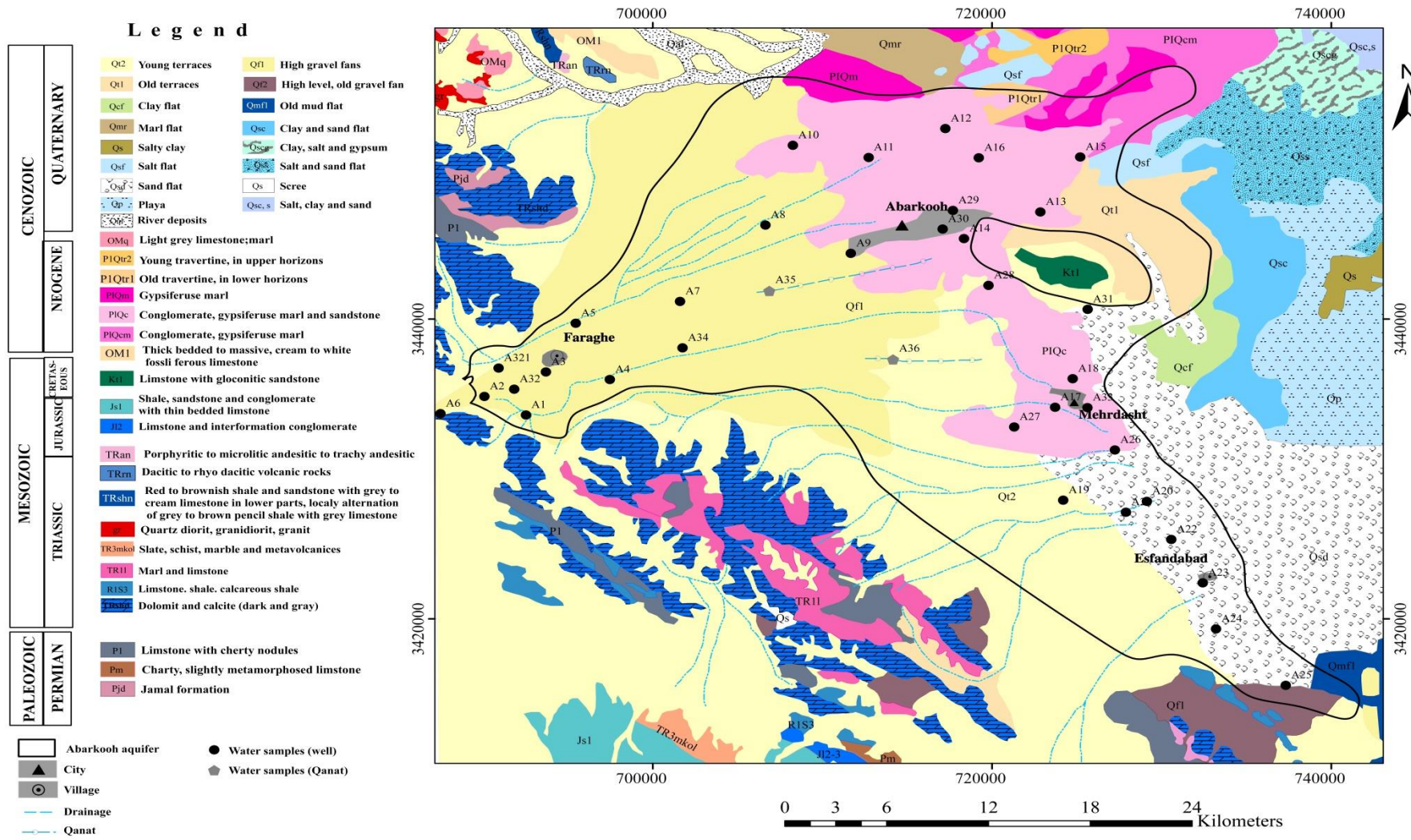
ج- تحقیقات میدانی و بازدید از منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری از منابع آبی

د- مطالعات آزمایشگاهی و آنالیز نمونه‌ها

ه- تجزیه و تحلیل داده‌ها و ارزیابی کیفی - زیست محیطی آبخوان

۳-۲- نمونه‌برداری از منابع آبی

اغلب چاه‌های بهره‌برداری آبخوان ابرکوه جهت فعالیت‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند و تعداد اندکی به مصرف صنعت، شرب و بهداشت می‌رسند. پس از بررسی موقعیت و مشخصات چاه‌های بهره‌برداری در گستره آبخوان، تعداد ۳۷ نمونه آب زیرزمینی در فروردین ۱۳۹۵ برداشت گردید که از این تعداد، ۳۵ نمونه از چاه و ۲ نمونه از قنات می‌باشند (شکل ۳-۱). نمونه‌های آب از چاه‌های در حال پمپاژ پس از چند دفعه شستشوی ظروف پلی‌اتیلن با آب آن چاه و پس از عبور از کاغذ صافی (فیلتر سلولزی) ۰/۴۵ میکرون درون آنها ریخته شدند. pH و هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها در محل اندازه‌گیری شده و نمونه‌ها جهت تجزیه یون‌های اصلی و نیترات به آزمایشگاه ارسال شدند. نمونه‌های آب جهت تعیین غلظت فلزات سنگین در ظروف جداگانه با اسید نیتریک خالص تا pH حدود ۲ تثبیت گردیدند.



شکل ۳-۱ موقعیت نقاط نمونه برداری از آبخوان ابرکوه (۳۵ نمونه از چاه و ۲ نمونه از قنات)

۳-۳- آنالیز نمونه‌ها

پس از ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه، میزان هدایت الکتریکی و pH نمونه‌ها جهت اطمینان از معرف بودن نمونه‌های برداشت شده از موقعیت انتخابی، مجدداً اندازه‌گیری شد (جدول ۳-۲). سپس نمونه‌ها جهت تعیین غلظت یون‌های اصلی و نیترات و فلزات سنگین بالقوه سمی (منتخب) مورد آنالیز قرار گرفتند که در ادامه روش آنالیز آنها بیان می‌گردد.

۳-۳-۱- یون‌های اصلی و نیترات

یون‌های اصلی در آب شامل کاتیون‌های کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم و آنیون‌های کلرید، بی-کربنات و سولفات می‌باشد. هدف از اندازه‌گیری غلظت این یون‌ها، تعیین منشأ آنها و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی (عوامل طبیعی) و غیر طبیعی (انسان‌زاد) بر کیفیت زیست محیطی آب است. تعیین غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، کلرید و بی‌کربنات به روش تیتراسیون، یون‌های سدیم و پتاسیم به روش فلیم‌فتومتری و یون سولفات به روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد (جدول ۳-۲).

نیترات یکی از یون‌هایی است که در اثر فعالیت‌های کشاورزی وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود. با توجه به انجام عمده فعالیت کشاورزی در گسترهٔ آبخوان دشت ابرکوه، این آبخوان می‌تواند مستعد آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی باشد. بنابراین غلظت آنیون نیترات به روش اسپکتروفتومتری در نمونه‌های برداشت شده، اندازه‌گیری شد.

جهت بررسی دقت و صحت داده‌های آنالیز یون‌های اصلی و نیترات، خطای تعادل بار (CBE)^۱ غلظت یون‌ها (بر حسب meq/l) طبق رابطه (۳-۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه مقدار درصد خطای محاسبه شده (E) تا کمتر از ۵٪± خوب و کمتر از ۱۰٪± قابل قبول می‌باشد (Chandrasekar et al. 2013; Montcoudiol et al. 2014).

$$E = \frac{\sum \text{Cation} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 \quad (3-1)$$

¹ Charge Balance Error

خطای تعادل بار محاسبه شده یون‌های اصلی و آنیون نیترات ابرکوه در ۸۰٪ نمونه‌ها کمتر از ۵٪± و در ۲۰٪ نمونه‌ها (که عمدتاً دارای هدایت الکتریکی بیش از ۶۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بودند) کمتر از ۱۰٪ می‌باشند.

۳-۳-۲- فلزات سنگین

با توجه به نتایج مطالعات و سوابق تحقیقاتی گذشته در خصوص آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در خصوص میزان غلظت فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی (Moore and Ramamoorthy 1984; Sharma 2015; Kouamé et al. 2013)، دو نمونه (A14 و A3) از نمونه‌های برداشت شده از ابرکوه انتخاب گردیدند و آنالیز شدند (جدول ۳-۱). این نمونه‌ها دارای بیشترین و کمترین هدایت الکتریکی هستند و به ترتیب در شرق و غرب ابرکوه واقع شده‌اند (شکل ۳-۱). طبق جدول ۳-۱، فلزات سنگین توسط دستگاه جذب اتمی شامل آرسنیک به روش HG-AAS^۱ و بقیه عناصر به روش GF-AAS^۲ آنالیز شدند. با توجه به مقایسه نتایج آنالیز دو نمونه و حد مقادیر ثبت شده غلظت فلزات سنگین و اولویت‌ها و استانداردهای زیست محیطی آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، فلزات سنگین بالقوه سمی شامل کادمیم، سرب و آرسنیک جهت آنالیز کل نمونه‌های برداشت شده تعیین شدند (جدول ۳-۳).

جدول ۳-۱ نتایج آنالیز فلزات سنگین در نمونه‌های آب A3 و A14 از ابرکوه

A14 (ppb)	A3 (ppb)	عناصر سنگین	
1.36	1.41	As	آرسنیک
7122	1592	B	بر
6.02	<0.15	Cd	کادمیم
11.64	7.42	Cr	کرم
99.93	<1.70	Cu	مس
86.01	<3.60	Ni	نیکل
12.14	<1.14	Pb	سرب
4.983	<0.10	Zn	روی
12480 $\mu\text{s/cm}$	1556 $\mu\text{s/cm}$	هدایت الکتریکی (EC)	

¹ Hydride Generation-Atomic Absorption Spectrometry

² Graphite Furnace-Atomic Absorption Spectrometry

۳-۴- تحلیل داده‌ها

پس از آنالیز نمونه‌ها، تحلیل داده‌ها به صورت کمی و کیفی بر اساس زمین‌شناسی محدوده آبخوان و نرم‌افزارهای مرتبط انجام شد. رسم نقشه‌های زمین‌شناسی، نقاط نمونه‌برداری و تغییرات مکانی پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3 و Surfer 13 انجام شد. ارزیابی کیفی و هیدروشیمیایی داده‌ها توسط نرم‌افزار AquaChem 2011، تعیین شاخص اشباع آب توسط نرم‌افزار Phreeqc 2 (2011) و همچنین تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS 21 و Excel 2010 انجام گردید. در پایان جهت تأیید نتایج بررسی منشأ یون‌های اصلی، نیترات و عناصر سنگین منتخب از روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) نیز استفاده شد.

جدول ۲-۳ نتایج آنالیز یون‌های اصلی و نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از آبخوان ابرکوه

No.	Sample Code	UTMx	UTMy	EC $\mu\text{s}/\text{cm}$	pH	TH CaCO_3	Cl ⁻ epm	SO ₄ ²⁻ epm	NO ₃ ⁻ epm	HCO ₃ ⁻ epm	ΣAnion	Na ⁺ epm	K ⁺ epm	Mg ²⁺ epm	Ca ²⁺ epm	Σcation	Error (CBE) %
1	A6	686643	3433478	1677	7.44	480	6.62	5.45	0.62	2.33	15.02	6	0.12	4.20	5.41	15.73	2.31
2	A2	690077	3434836	2000	7.17	720	8.45	6.37	0.80	3.11	18.74	7	0.13	6.10	8.32	21.54	6.97
3	A1	692531	3433601	1505	7.16	460	5.63	4.63	0.54	3.21	14.01	5.4	0.15	3.70	5.51	14.76	2.62
4	A32	691836	3435320	1480	7.39	440	6.05	4.65	0.52	2.59	13.82	5.7	0.09	3.60	5.21	14.60	2.76
5	A321	690914	3436729	1729	7.43	575	6.34	6.67	0.73	2.59	16.32	5	0.08	4.30	7.21	16.59	0.81
6	A3	693706	3436470	1556	7.36	465	7.04	4.97	0.56	2.89	15.45	6	0.12	3.60	5.71	15.43	-0.08
7	A4	697473	3435966	2000	7.28	800	8.87	6.28	0.72	3.05	18.92	4.6	0.13	8.70	7.31	20.74	4.59
8	A5	695463	3439722	2000	7.26	780	9.15	7.43	0.66	2.85	20.10	5.1	0.10	7.60	8.02	20.82	1.77
9	A7	701609	3441178	1694	7.42	450	8.31	4.78	0.46	2.52	16.07	6.6	0.12	5.00	4.01	15.72	-1.09
10	A34	701758	3438078	1897	7.41	550	7.46	6.19	0.57	2.16	16.39	6.81	0.10	3.89	4.91	15.71	-2.11
11	A35	706874	3441878	2050	7.67	600	15.77	5.99	0.73	1.48	23.96	11	0.12	6.20	5.81	23.13	-1.77
12	A8	706645	3446270	1192	7.09	365	5.91	3.60	0.31	3.41	13.23	4.9	0.09	3.30	4.01	12.30	-3.64
13	A36	714170	3437305	1241	7.76	325	6.34	3.55	0.32	2.36	12.57	5.6	0.08	3.20	3.31	12.18	-1.55
14	A9	711678	3444384	1295	7.37	365	6.62	3.80	0.24	2.62	13.28	5.1	0.10	4.30	3.01	12.51	-3.00
15	A10	708262	3451593	1361	7.39	355	6.62	3.67	0.22	2.85	13.37	5.9	0.09	4.60	2.51	13.09	-1.03
16	A11	712730	3450780	1605	7.33	450	7.32	4.99	0.26	2.95	15.52	8	0.12	5.00	4.01	17.12	4.91
17	A30	717094	3446007	2020	7.32	525	11.83	6.27	0.27	2.49	20.86	9	0.31	5.70	4.81	19.82	-2.56
18	A12	717250	3452711	4900	6.96	1220	29.85	8.59	0.45	7.54	46.43	26.5	0.38	13.10	11.32	51.30	4.98
19	A29	717696	3447250	8250	7.02	1700	80.96	5.76	0.32	4.43	91.46	60	0.26	4.30	16.032	80.59	-6.32
20	A14	718349	3445369	12480	6.86	2100	113.12	7.30	0.29	6.49	127.21	70	0.68	22.00	20.04	112.72	-6.04
21	A28	719797	3442245	1748	7.59	350	12.67	2.77	0.16	2.49	18.09	9.4	0.10	4.30	2.71	16.51	-4.57
22	A16	719223	3450760	1956	7.25	365	13.24	3.34	0.09	3.57	20.24	9.95	0.20	4.10	3.21	17.46	-7.37
23	A13	722853	3447146	2680	7.36	525	18.02	5.93	0.23	2.49	26.68	13.5	0.13	5.10	5.41	24.14	-5.00
24	A15	725202	3450813	5740	7.03	1700	41.11	13.00	0.25	2.69	57.06	21.25	0.26	20.16	14.03	55.70	-1.20
25	A31	725640	3440647	6650	7.06	1000	54.91	6.98	0.22	5.28	67.40	51	0.31	10.00	10.02	71.33	2.83

ادامه جدول ۲-۳ نتایج آنالیز یون‌های اصلی و نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از آبخوان ابرکوه

No.	Sample Code	UTMx	UTMy	EC μs/cm	pH	TH CaCO ₃	Cl ⁻ epm	SO ₄ ²⁻ epm	NO ₃ ⁻ epm	HCO ₃ ⁻ epm	ΣAnion	Na ⁺ epm	K ⁺ epm	Mg ²⁺ epm	Ca ²⁺ epm	Σcation	Error (CBE) %
26	A27	721309	3432799	1532	7.56	425	8.17	3.48	0.16	2.49	14.30	5	0.12	5.60	2.91	13.62	-2.43
27	A17	723722	3434115	1572	7.3	425	8.31	3.61	0.19	2.07	14.17	4.4	0.15	5.90	2.61	13.06	-4.09
28	A18	724759	3436023	1567	7.34	450	9.86	3.70	0.16	2.43	16.15	6.25	0.15	6.30	2.71	15.41	-2.35
29	A33	725626	3434092	1937	7.57	560	11.55	3.72	0.25	2.20	17.72	6.6	0.15	8.20	3.01	17.96	0.67
30	A26	727246	3431264	3220	7.73	1050	28.16	3.35	0.10	2.23	33.84	12.75	0.22	19.50	1.50	33.97	0.20
31	A19	724199	3427917	1320	7.38	380	8.73	2.81	0.11	2.66	14.30	5.6	0.15	5.10	2.51	13.36	-3.41
32	A21	727897	3427114	1318	7.36	350	5.63	4.35	0.21	2.69	12.89	4.9	0.26	4.20	2.81	12.16	-2.90
33	A20	729134	3427837	5790	7.05	2200	61.25	2.59	0.14	1.48	65.45	11.6	0.26	40.00	4.01	55.86	-7.91
34	A22	730568	3425294	11290	7.17	1700	119.68	3.80	0.20	1.57	125.26	74	0.64	20.40	12.83	107.86	-7.46
35	A24	733205	3419325	8890	7.25	2300	87.30	4.11	0.26	1.61	93.27	36.5	0.36	25.60	20.44	82.90	-5.89
36	A25	737316	3415564	9220	7.27	1840	88.00	9.96	0.32	1.48	99.76	50	0.33	19.60	17.23	87.17	-6.74
37	A23	732423	3422399	15330	7.46	1700	180.93	3.71	0.28	1.38	186.30	130	0.74	19.20	14.83	164.77	-6.13

جدول ۳-۳ نتایج آنالیز فلزات سنگین منتخب در نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت شده از آبخوان ابرکوه

No.	Sample Code	UTMx	UTMy	pH	EC $\mu\text{s/cm}$	As ppb	Cd ppb	Pb ppb
1	A6	686643	3433478	7.44	1677	2.9	<0.112	<1.76
2	A2	690077	3434836	7.17	2000	1.85	<0.112	<1.76
3	A1	692531	3433601	7.16	1505	1.81	<0.112	<1.76
4	A32	691836	3435320	7.39	1480	1.76	<0.112	<1.76
5	A321	690914	3436729	7.43	1729	1.34	<0.112	<1.76
6	A3	693706	3436470	7.36	1556	1.41	<0.148	<1.14
7	A4	697473	3435966	7.28	2000	1.28	<0.112	<1.76
8	A5	695463	3439722	7.26	2000	1.2	<0.112	<1.76
9	A7	701609	3441178	7.42	1694	1.49	<0.112	<1.76
10	A34	701758	3438078	7.41	1897	1.5	<0.112	<1.76
11	A35	706874	3441878	7.67	2050	2.82	<0.112	<1.76
12	A8	706645	3446270	7.09	1192	1.93	<0.112	<1.76
13	A36	714170	3437305	7.76	1241	1.14	<0.112	<1.76
14	A9	711678	3444384	7.37	1295	1.48	<0.112	<1.76
15	A10	708262	3451593	7.39	1361	1.31	<0.112	<1.76
16	A11	712730	3450780	7.33	1605	11.91	<0.112	<1.76
17	A30	717094	3446007	7.32	2020	0.85	<0.112	<1.76
18	A12	717250	3452711	6.96	4900	8.39	1.105	<1.76
19	A29	717696	3447250	7.02	8250	1.62	2.195	5.76
20	A14	718349	3445369	6.86	12480	1.36	6.02	12.14
21	A28	719797	3442245	7.59	1748	1.15	<0.112	<1.76
22	A16	719223	3450760	7.25	1956	0.49	<0.112	<1.76
23	A13	722853	3447146	7.36	2680	8.02	<0.112	<1.76
24	A15	725202	3450813	7.03	5740	12.72	1.165	<1.76
25	A31	725640	3440647	7.06	6650	6.05	1.771	7.99
26	A27	721309	3432799	7.56	1532	1.62	<0.112	<1.76
27	A17	723722	3434115	7.3	1572	1.31	<0.112	<1.76
28	A18	724759	3436023	7.34	1567	1.06	<0.112	<1.76
29	A33	725626	3434092	7.57	1937	1.6	<0.112	<1.76
30	A26	727246	3431264	7.73	3220	3.33	<0.112	<1.76
31	A19	724199	3427917	7.38	1320	1.42	<0.112	<1.76
32	A21	727897	3427114	7.36	1318	1.13	<0.112	<1.76
33	A20	729134	3427837	7.05	5790	0.65	0.427	<1.76
34	A22	730568	3425294	7.17	11290	0.54	2.708	7.84
35	A24	733205	3419325	7.25	8890	0.38	2.749	9.45
36	A25	737316	3415564	7.27	9220	2.1	2.784	8.68
37	A23	732423	3422399	7.46	15330	0.68	7.198	16.43

فصل چہارم

نتایج و بحث

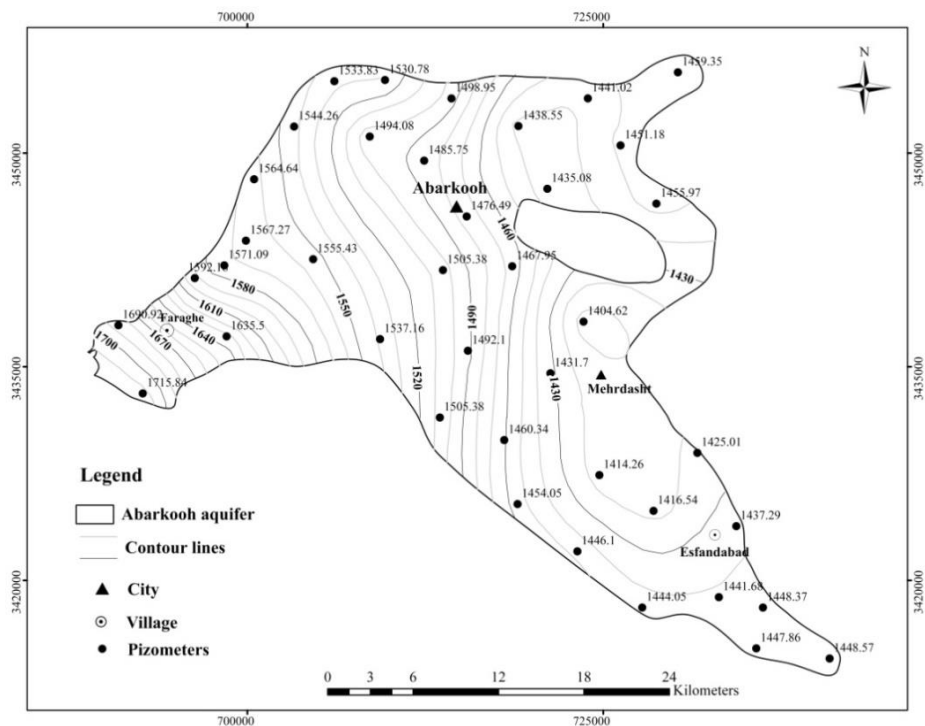
۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از آنالیز پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه جهت شناسایی تأثیر عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد بر کیفیت آن مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. محصور شدن آبخوان ابرکوه از غرب توسط ارتفاعات آهکی و دولومیتی و از شرق توسط کفه گلی - نمکی (پلایا) و بهره‌برداری از آبخوان جهت فعالیت‌های کشاورزی می‌تواند سبب تغییر در خصوصیات کیفی و کمی آن شود. با توجه به نقش هیدروژئولوژی در کیفیت آبخوان، ابتدا نقشه‌های هم‌پتانسیل و جهت جریان آبخوان مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه هیدروژئوشیمی زیست محیطی آبخوان تجزیه و تحلیل می‌گردد.

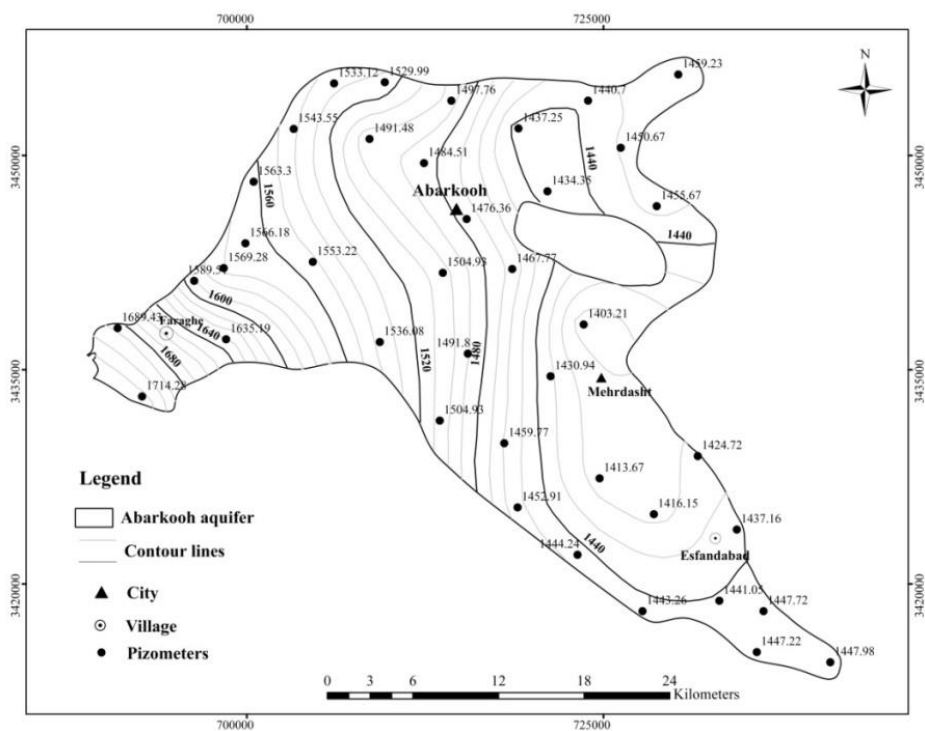
۴-۲- هیدروژئولوژی آبخوان ابرکوه

با توجه به آمار سطح ایستابی در پیرومترهای آبخوان ابرکوه در سال ۱۳۹۴، کمترین تراز سطح ایستابی در ماه اسفند و بیشترین آن در ماه فروردین رخ داده است. با رسم نقشه‌های هم‌پتانسیل حداکثر (شکل ۴-۱) و حداقل (شکل ۴-۲) سطح ایستابی آبخوان ابرکوه، جهت جریان آب زیرزمینی تعیین گردید. با بررسی این دو نقشه جهت کلی جریان از سمت غرب به سمت مرکز و شرق آبخوان می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۳، منطقه تغذیه آبخوان عمدتاً مربوط به ارتفاعات آهکی و دولومیتی واقع در غرب آبخوان (تنگه گاشار) می‌باشد، در این محدوده بالاترین تراز سطح ایستابی مشاهده می‌شود. در حاشیه شرقی آبخوان در امتداد کفه و پلایای ابرکوه جهت جریان معکوس شده و از سمت کفه به سمت داخل آبخوان (شرق به غرب) می‌باشد. کمترین مقدار تراز سطح ایستابی در نقشه‌های هم‌پتانسیل آبخوان در محدوده مهردشت و اسفندآباد مشاهده می‌گردد. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری (شکل ۴-۳) و مقاطع ترسیم شده AB و CD، نشان دهنده تجمع چاه‌ها و بنابراین تخلیه متمرکز آبخوان در این محدوده بوده که ضمن ایجاد مخروط افت (منحنی‌های بسته در نقشه هم‌پتانسیل)

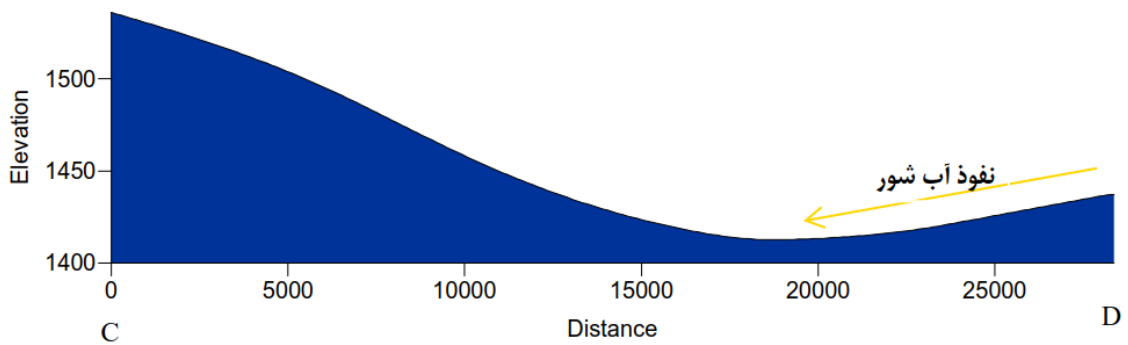
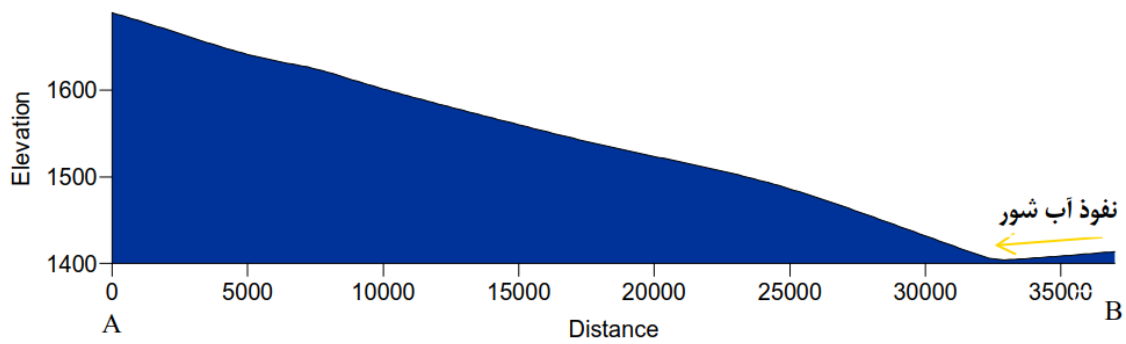
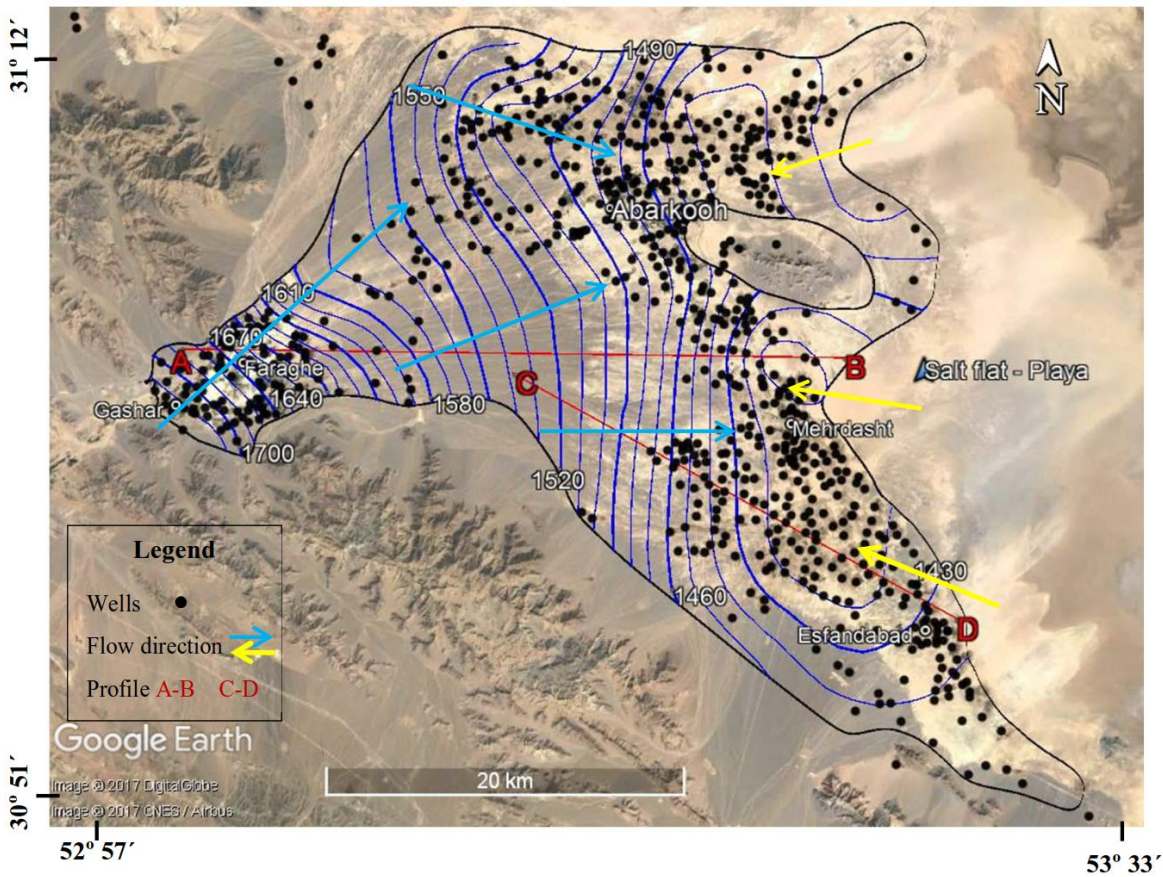
کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در این منطقه را به دنبال دارد. این موضوع نفوذ احتمالی آب زیرزمینی شور از سمت کفۀ نمکی به داخل آبخوان ابرکوه در حاشیۀ شرقی را در پی خواهد داشت.



شکل ۴-۱ نقشه هم‌پتانسیل آبخوان ابرکوه (حداکثر تراز سطح ایستابی در فروردین ۱۳۹۴)



شکل ۴-۲ نقشه هم‌پتانسیل آبخوان ابرکوه (حداقل تراز سطح ایستابی در اسفند ۱۳۹۴)



شکل ۳-۴ جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان ابرکوه (بالا) و مقاطع تهیه شده از تغییرات تراز سطح ایستابی در راستای تقریبی شرقی - غربی (پایین)

۳-۴- ارزیابی کیفی آبخوان ابرکوه

به منظور بررسی هیدروژئوشیمی آبخوان ابرکوه ابتدا خلاصه‌ای از آمار توصیفی پارامترهای اندازه-گیری شده شامل مقدار بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و چولگی ارائه می‌شود. جدول ۱-۴ خلاصه آمار توصیفی نتایج آنالیز یون‌های اصلی، نیترات و فلزات سنگین منتخب را نشان می‌دهد. طبق محاسبه چولگی، توزیع داده‌های pH آب نرمال و داده‌های نیترات نزدیک به نرمال هستند (ضریب چولگی نزدیک به صفر)، دیگر پارامترهای اندازه‌گیری شده از توزیع غیر نرمال برخوردار می‌باشند.

جدول ۱-۴ خلاصه آمار توصیفی پارامترهای هیدروشیمیایی در آبخوان ابرکوه

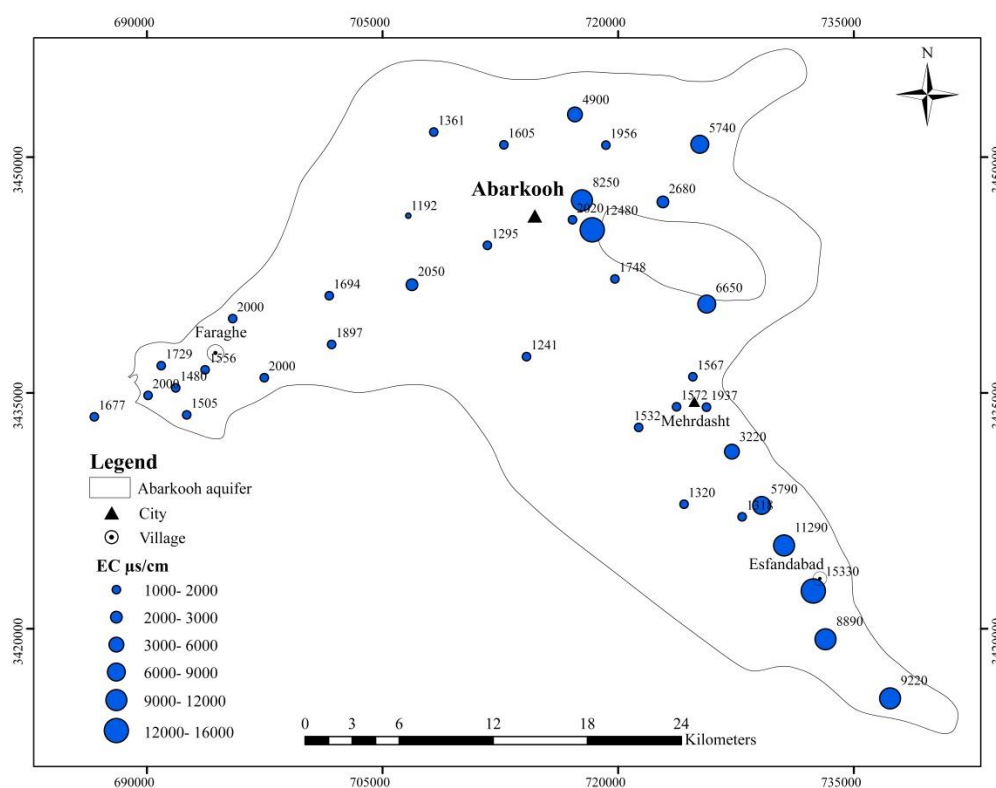
چولگی	انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
Skewness	Std. Deviation	Mean	Maximum	Minimum	
0	0.21	7.32	7.76	6.86	pH
1.81	3631.78	3667.35	15330	1192	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
1.24	612.24	839.05	2300	325	*TH (mg/l)
1.83	1637.44	1776.56	7262.6	667.4	TDS (mg/l)
2.13	1456.14	1070.53	6423	199.93	Cl (mg/l)
1.64	103.61	249.29	624.01	124.52	SO₄ (mg/l)
2.18	78.24	172.65	460	84	HCO₃ (mg/l)
0.82	12.62	21.69	49.9	5.57	**NO₃ (mg/l)
2.58	619.87	445.64	2990	101.2	Na (mg/l)
2	6.5	8.31	29	3	K (mg/l)
1.96	101.21	113.97	488	39.04	Mg (mg/l)
1.31	104.99	140.11	408.81	30.06	Ca (mg/l)
2.46	2.98	2.53	12.72	0.38	As ($\mu\text{g}/\text{l}$)
2.75	1.65	0.8	7.2	0.06	Cd ($\mu\text{g}/\text{l}$)
2.29	3.81	2.56	16.43	0.88	Pb ($\mu\text{g}/\text{l}$)

*سختی کل بر حسب کربنات کلسیم، **نیترات بر حسب NO_3 ، تعداد نمونه: ۳۷ عدد

۳-۴-۱- تغییرات مکانی هدایت الکتریکی (EC)

دامنه تغییرات پارامتر هدایت الکتریکی در محدوده آبخوان ابرکوه زیاد و از حدود ۱۰۰۰ تا بیش از ۱۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر می‌باشد (جدول ۱-۴). مقدار هدایت الکتریکی از غرب (محل تغذیه) به سمت حاشیه شرقی آبخوان (محدوده کفه نمکی ابرکوه) افزایش قابل توجهی دارد. بیش از

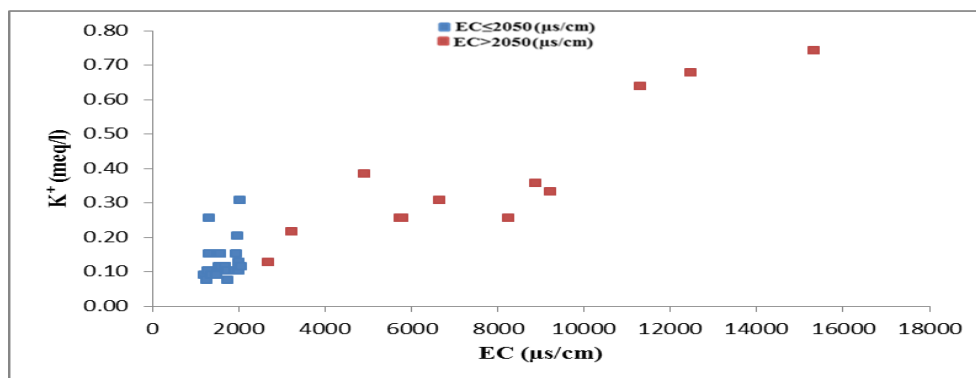
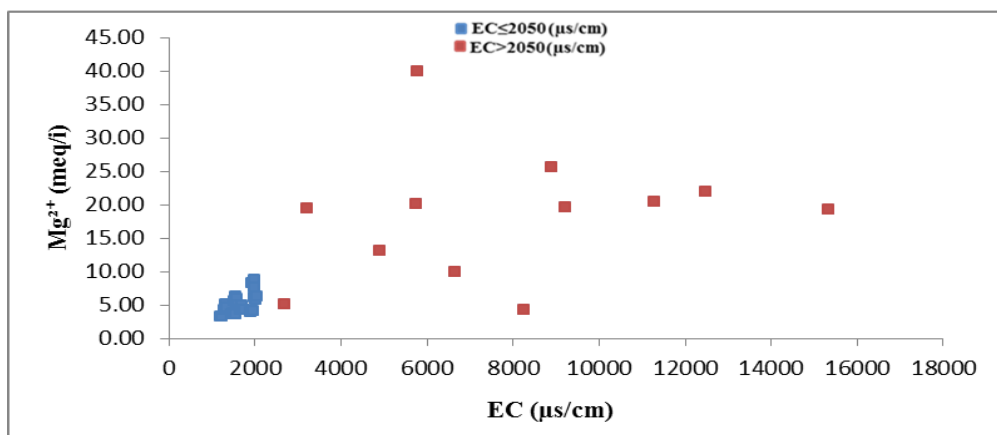
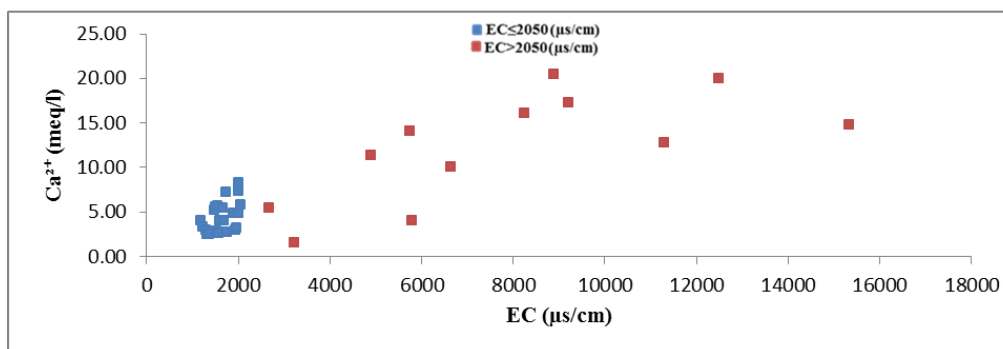
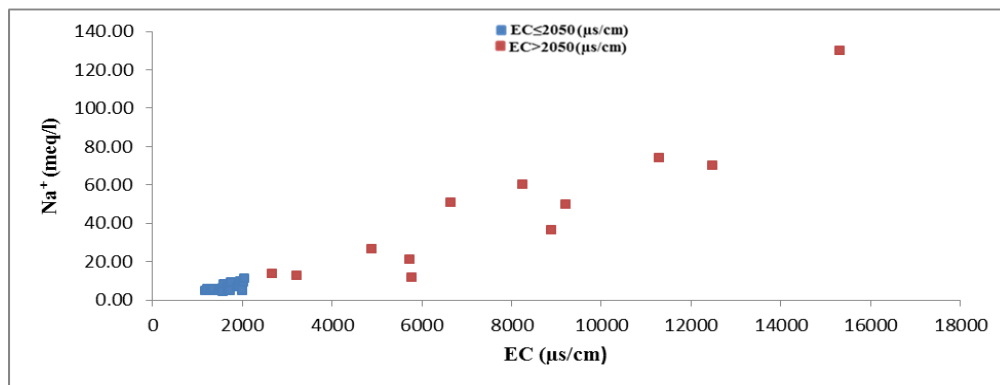
۶۰ درصد نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه از هدایت الکتریکی کمتر از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر برخوردار بوده که عمدتاً در غرب و بخش مرکزی آبخوان واقع شده‌اند (شکل ۴-۴). با توجه به زمین شناسی آبخوان که در فصل اول به آن پرداخته شد، این بهبود کیفیت بیشتر تحت تأثیر تغذیه و شرایط زمین‌شناسی مناسب در کاهش املاح آب زیرزمینی می‌باشد. افزایش شوری یا املاح آب زیرزمینی در حاشیه شرقی آبخوان به ویژه در امتداد جنوب شرقی در محدوده مهر دشت و اسفند آباد (شکل ۴-۴) را می‌توان ناشی از تأثیر کفه‌های گلی - نمکی (رسی و ریزدانه) منطقه، نفوذ آب شور از سمت کفه به داخل آبخوان یا افزایش عمق برداشت آب زیرزمینی و احتمالاً برداشت از لایه‌های آب شور و دارای املاح زیاد عمقی دانست (مهندسین مشاور پورآب، ۱۳۹۱). با فاصله گرفتن از حاشیه جنوب شرقی آبخوان (اسفند آباد) به سمت غرب از املاح و بنابراین هدایت الکتریکی آب زیرزمینی ناشی از شرایط تغذیه بهتر آبخوان کاسته می‌شود.



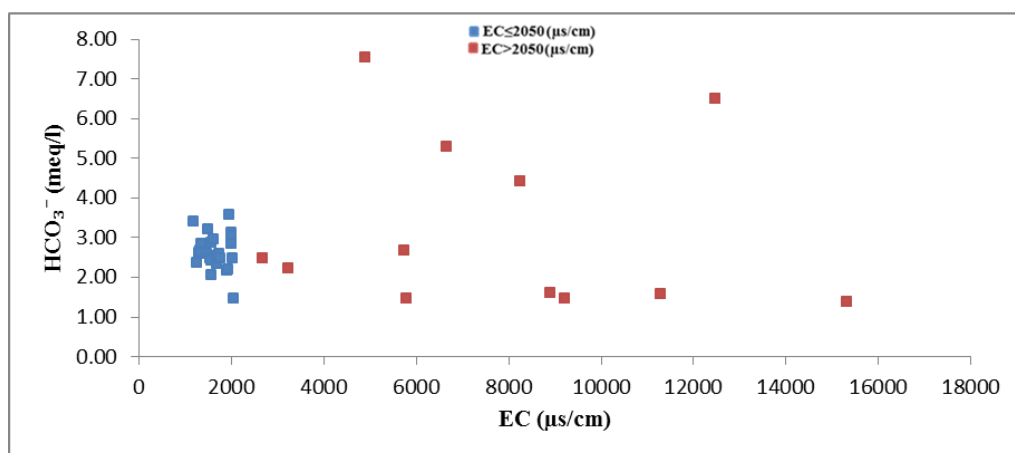
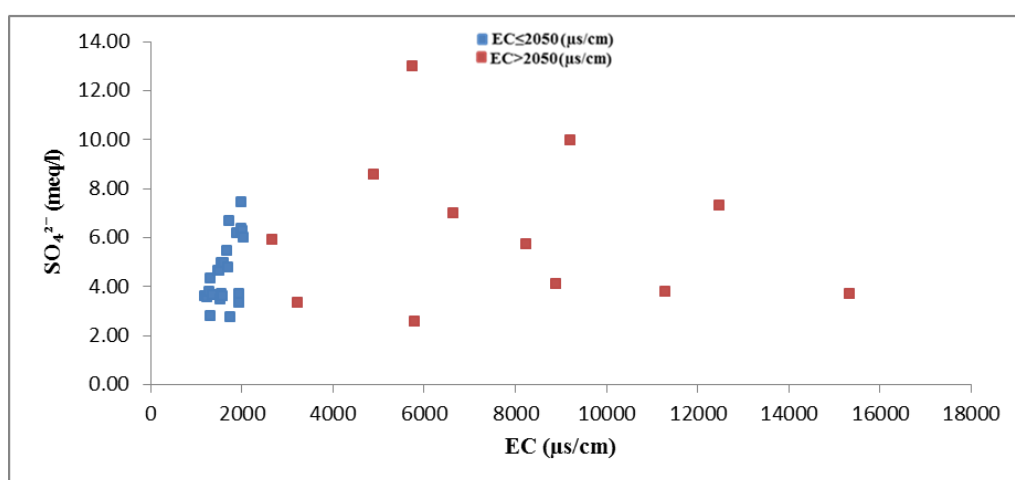
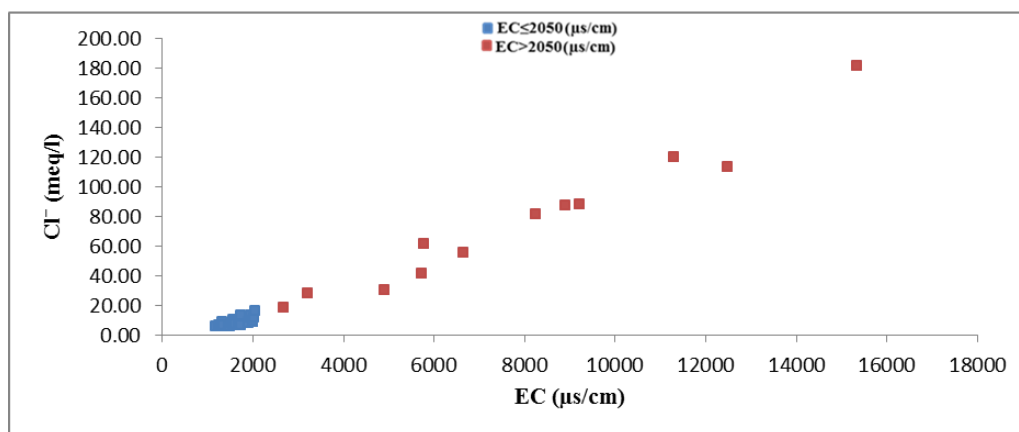
شکل ۴-۴ تغییرات هدایت الکتریکی در محدوده آبخوان ابرکوه

۴-۳-۱-۱-ارتباط هدایت الکتریکی با یون‌های اصلی

تغییرات غلظت یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، بی‌کربنات، سولفات و کلر در برابر میزان هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه در شکل ۴-۵ (کاتیون‌ها) و شکل ۴-۶ (آنیون‌ها) رسم شده است. با توجه به ارتباط هدایت الکتریکی با غلظت یون‌های اصلی می‌توان نمونه‌ها را در دو گروه تفکیک نموده و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد. گروه اول شامل نمونه‌های با هدایت الکتریکی ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و کمتر از آن (۲۵ نمونه) و گروه دوم شامل نمونه‌های با هدایت الکتریکی بیش از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر (۱۲ نمونه) می‌باشد. افزایش هدایت الکتریکی به صورت ناگهانی در نمونه‌های گروه دوم که در امتداد جنوب شرقی و شمال شرقی (شرق شهرستان ابرکوه) آبخوان واقع هستند، دیده می‌شود (شکل ۴-۴). با افزایش هدایت الکتریکی به ویژه در نمونه‌های گروه دوم، غلظت کاتیون‌ها هم افزایش می‌یابد (شکل ۴-۵). افزایش شوری و املاح در نمونه‌های گروه دوم که در شرق آبخوان واقع شده‌اند، بیشتر از همه به کاتیون سدیم مرتبط یا وابسته است. همچنین آنیون کلر در بین تغییرات غلظت آنیون‌ها (شکل ۴-۶) در افزایش هدایت الکتریکی نمونه‌های گروه دوم، ارتباط کاملاً معنی‌داری دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، افزایش شوری نمونه‌های آب گروه دوم عمدتاً در اثر یون‌های سدیم و کلر ناشی از نفوذ آب شور است.



شکل ۴-۵ تغییرات غلظت کاتیون‌های اصلی در برابر هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه

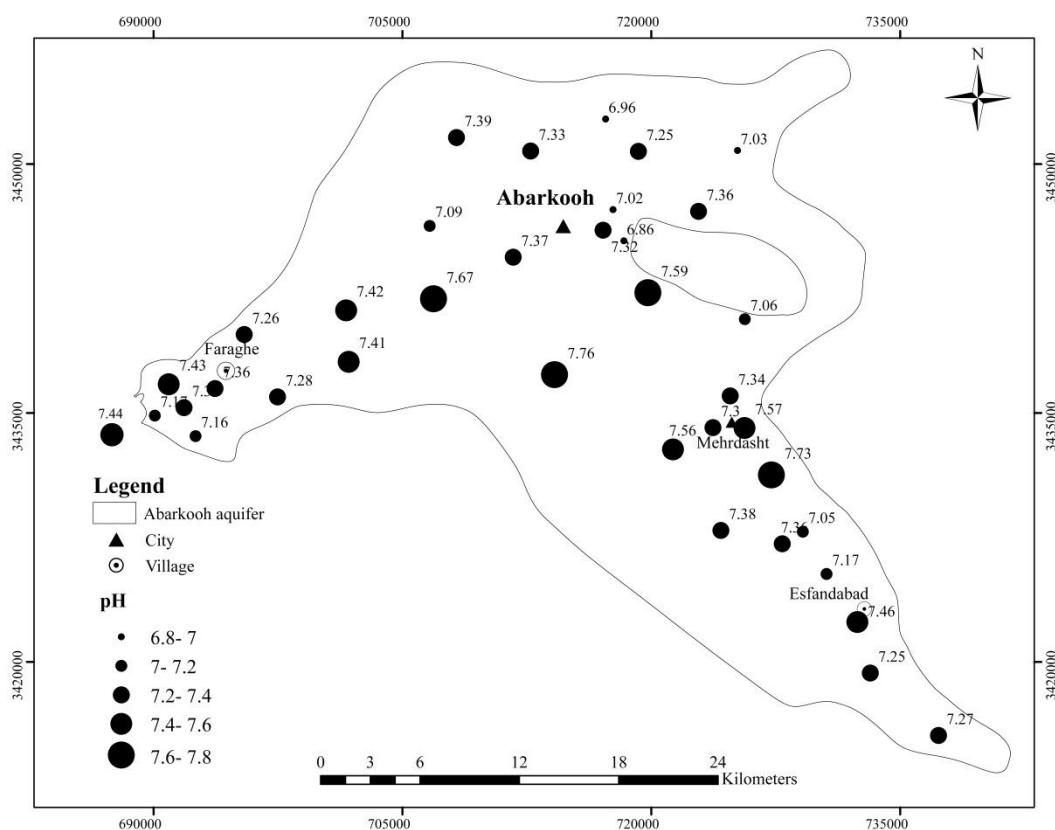


شکل ۴-۶ تغییرات غلظت آنیون‌های اصلی در برابر هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه

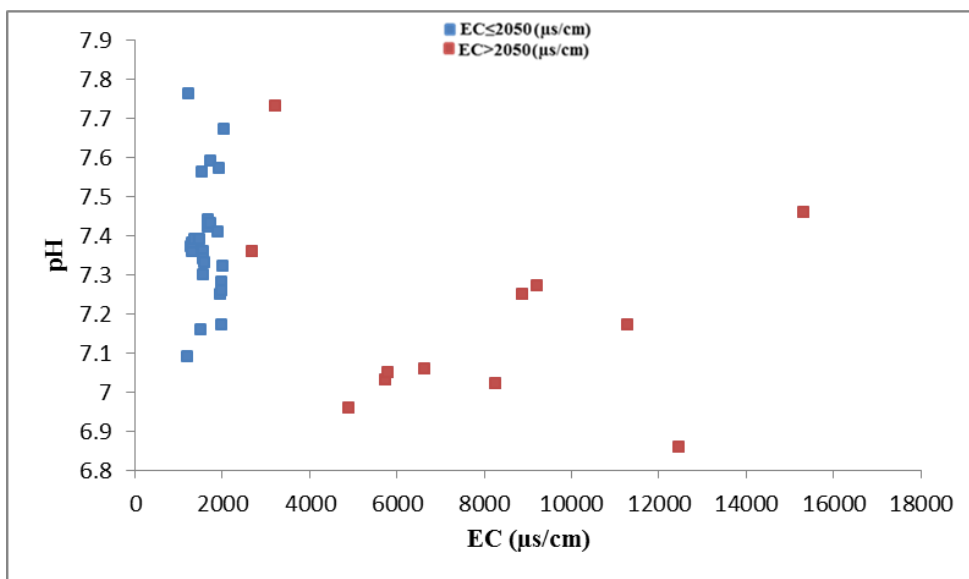
۴-۳-۲- تغییرات مکانی pH

با توجه به جدول ۴-۱ دامنه تغییرات pH نمونه‌های آب زیرزمینی از ۶/۸۶ تا ۷/۷۶ می‌باشد. معمولاً در آب‌های زیرزمینی در شرایط طبیعی محدوده تغییرات pH از ۶/۵ الی ۸/۵ است

(Stumm and Morgan 1996; WHO 2011; EPA 2012). شکل ۴-۷ توزیع و تغییرات pH را در محدوده آبخوان نشان می‌دهد، به جز دو نمونه در شمال شرق، تغییرات pH سایر نمونه‌ها از ۷ تا ۷/۷۶ و دارای بازه کم بوده، که این می‌تواند از خاصیت بافری آب زیرزمینی به علت افزایش شوری و املاح زیاد باشد (عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۴ و Isa et al. 2013). تغییرات pH در مقابل هدایت الکتریکی آبخوان در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. مطابق شکل در برخی از نمونه‌های گروه دوم (هدایت الکتریکی بیشتر از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر)، مقدار pH کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش قدرت یونی آب و همچنین ایجاد شرایط مناسب برای رسوب کلسیت در اثر افزایش املاح در آب زیرزمینی باشد.



شکل ۴-۷ تغییرات pH در محدوده آبخوان ابرکوه



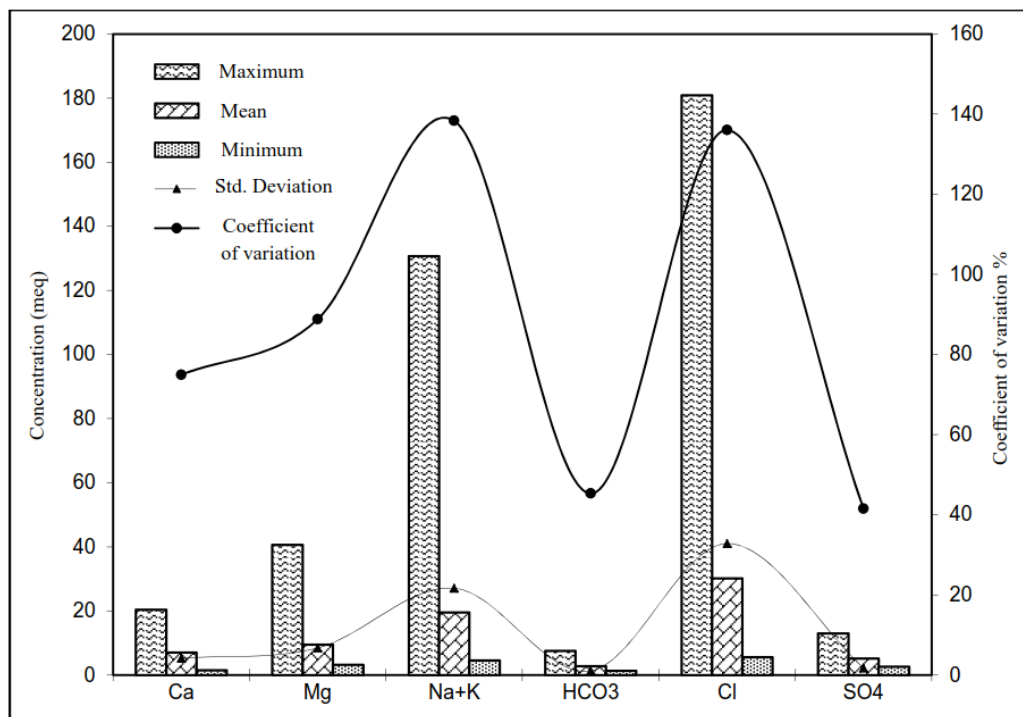
شکل ۴-۸ تغییرات pH در برابر هدایت الکتریکی نمونه‌های آبخوان ابرکوه

۳-۳-۴- بررسی تغییرات غلظت یون‌های اصلی

پارامترهای آماری یون‌های اصلی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه در شکل ۴-۹ نشان داده شده است، بیشترین ضریب تغییرات و انحراف معیار غلظت یون‌ها مربوط به یون‌های کلسیم و سدیم بوده و کمترین آنها مربوط به یون‌های بی‌کربنات و سولفات می‌باشد. یون کلسیم بیشترین میانگین غلظت و یون پتاسیم کمترین میانگین غلظت در بین یون‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند. ترتیب فراوانی غلظت آنیون‌های اصلی به صورت $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ و کاتیون‌های اصلی به صورت $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ می‌باشد. بنابراین یون‌های غالب در منابع آب زیرزمینی آبخوان ابرکوه شامل کاتیون سدیم و آنیون کلسیم است. جهت بررسی بیشتر در صورتی که نمودار توزیع غلظت یون‌ها بر اساس افزایش شوری (هدایت الکتریکی) نمونه‌های آب زیرزمینی رسم شود (شکل ۴-۱۰) روند تغییرات غلظت در گروه دوم نسبت به گروه اول بارزتر می‌باشد. افزایش بیشتر و ناگهانی غلظت سدیم در مقایسه با سایر کاتیون‌ها و همچنین افزایش بسیار زیادتر کلسیم نسبت به سایر آنیون‌ها تأیید کننده تأثیر نفوذ آب شور بر منابع آب زیرزمینی دشت ابرکوه می‌باشد. به طور کلی افزایش غلظت

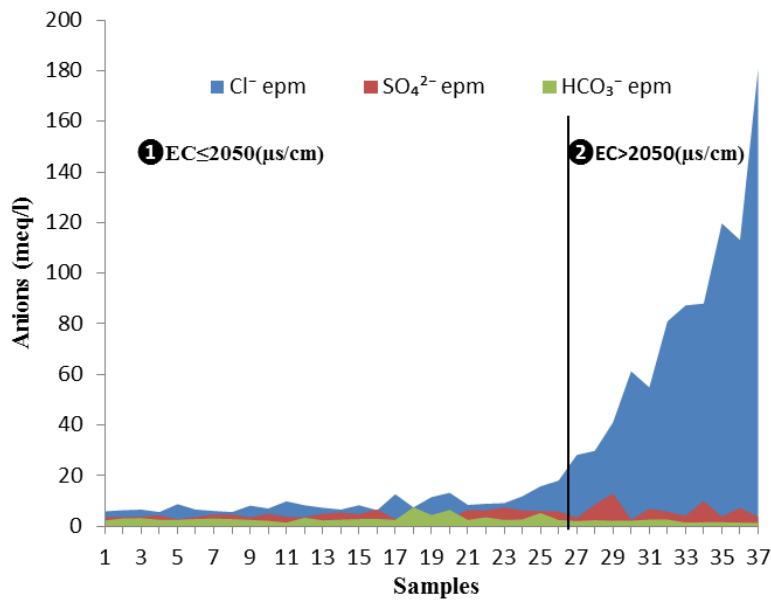
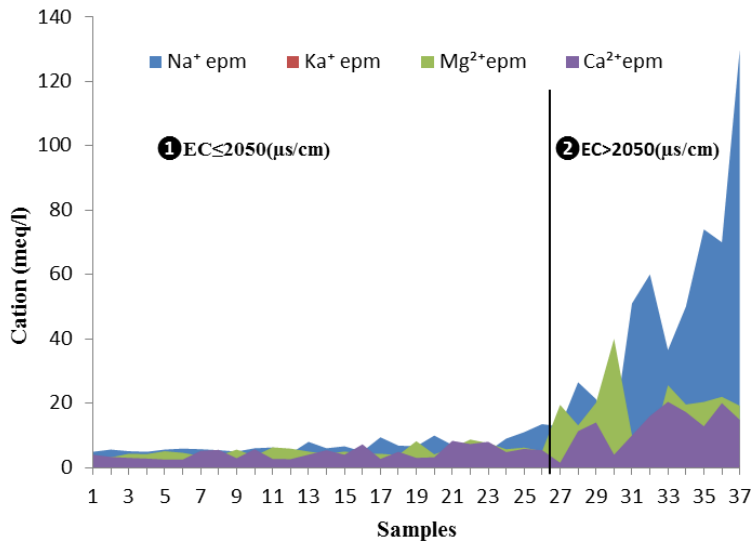
یون کلر در آب زیرزمینی با توجه به رفتار غیرواکنشی^۱ این یون می‌تواند ناشی از فرآیند تبخیر در مناطق خشک و کم عمق سطح آب زیرزمینی (۳ تا ۱۵ متر) باشد (Mohamed et al. 2016).

بر اساس داده‌های عمق سطح ایستابی در پیزومترها در سال ۱۳۹۴ عمق سطح آب زیرزمینی در محدوده آبخوان ابرکوه بیش از ۱۵ متر و در محدوده غرب آن در نقاطی که میزان EC به حداکثر می‌رسد، بیش از دو برابر این مقدار است، بنابراین فرایند تبخیر امکانپذیر نبوده و افزایش غلظت کلر ناشی از سایر فرایندها می‌باشد. همانطور که قبلاً بیان گردید افزایش غلظت یون کلر و سدیم ناشی از هجوم آب شور بوده که در ادامه با تعیین تیپ هیدروشیمیایی نمونه‌ها و تعیین منشأ یون‌ها به صورت جزئی‌تر، بررسی خواهد شد.

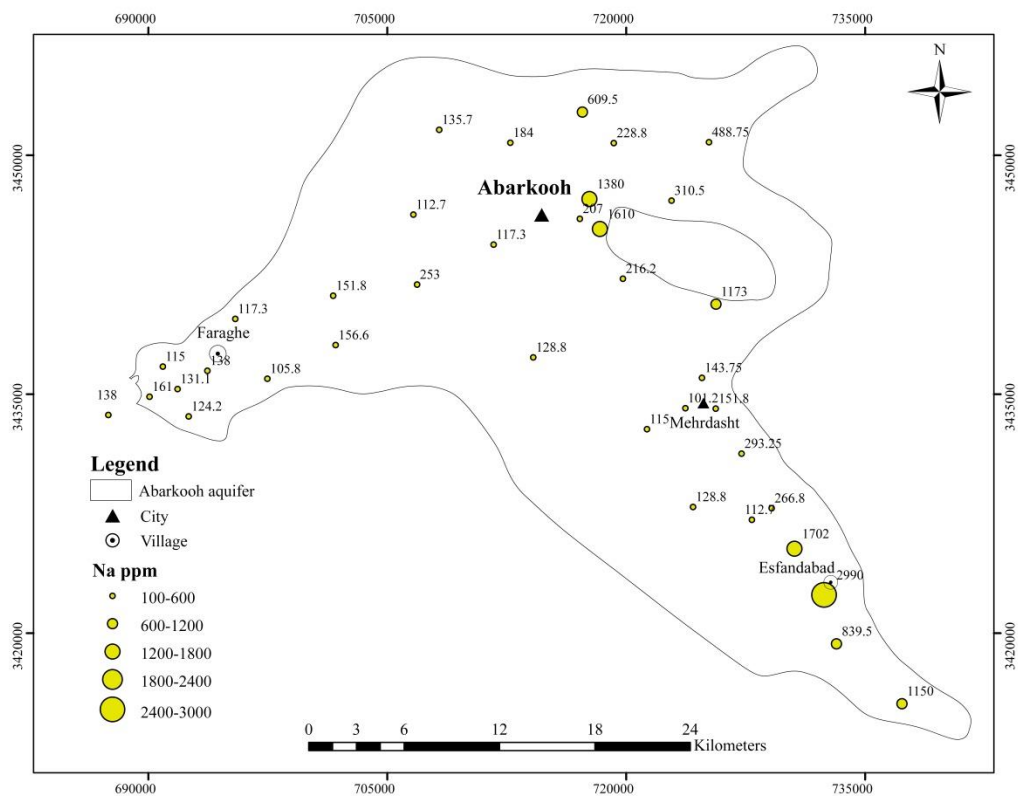


شکل ۴-۹ پارامترهای آماری مربوط به یون‌های اصلی آبخوان ابرکوه

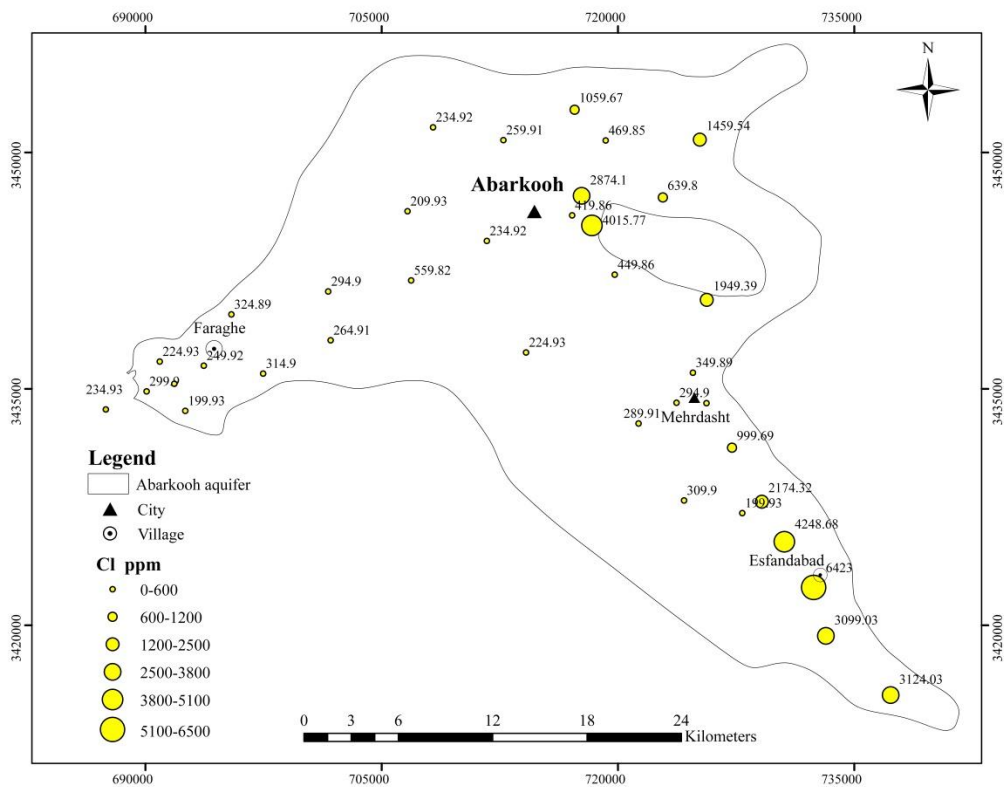
¹ Conservative



شکل ۴-۱۰ توزیع غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها همراه با افزایش شوری (هدایت الکتریکی) نمونه‌ها در آبخوان ابرکوه نقشه تغییرات مکانی غلظت یون‌های غالب سدیم و کلر که به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ نشان داده شده است. مشابه تغییرات هدایت الکتریکی از غرب آبخوان (محل تغذیه) به سمت شرق و به ویژه در محدوده جنوب شرقی (اسفند آباد) در مجاورت کفه نمکی، غلظت یون‌های مذکور به حداکثر رسیده است.



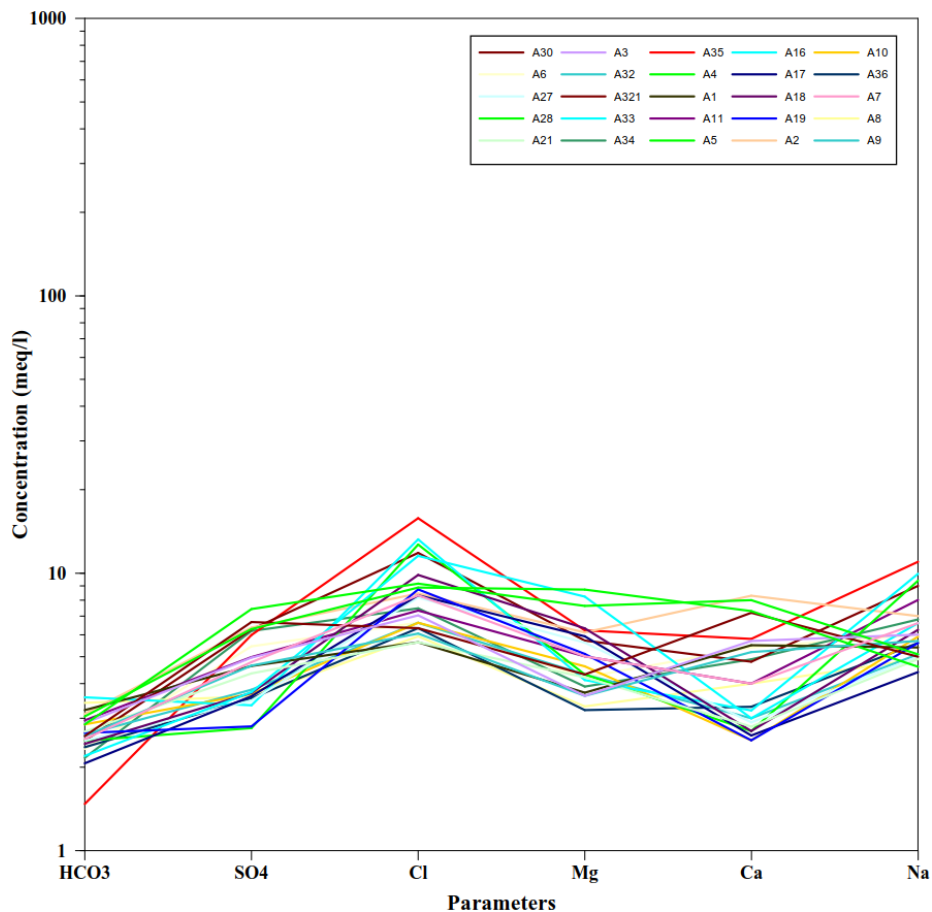
شکل ۴-۱۱ تغییرات غلظت یون سدیم در محدوده آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۱۲ تغییرات غلظت یون کلر در محدوده آبخوان ابرکوه

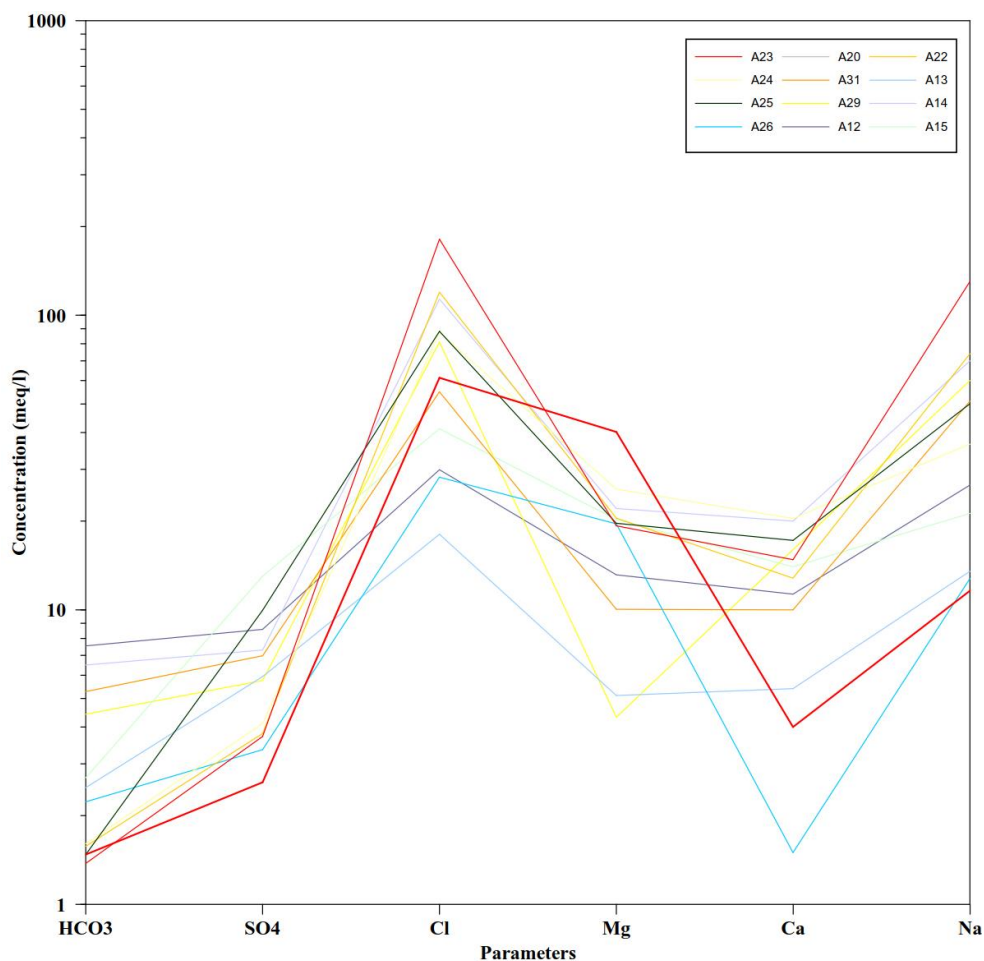
۴-۳-۱- نمودار شولر ۱۰

از نمودار نیمه لگاریتمی شولر به منظور مقایسه و نشان دادن تغییرات غلظت یون‌های اصلی در تعداد زیادی از نمونه‌ها استفاده می‌شود. شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ به ترتیب نمودار شولر مربوط به نمونه‌های گروه یک و گروه دو را نشان می‌دهد. مقایسه این دو نمودار، نشان می‌دهد که روند تغییرات غلظت یون‌ها و ترکیب هیدروشیمیایی در نمونه‌های هر دو گروه تا حدودی شبیه یکدیگر بوده با این تفاوت که مقادیر کلر و سدیم در نمونه‌های گروه دو در مقایسه با سایر یونها افزایش بیشتری داشته است. همانطور که بیان گردید ترکیب هیدروشیمیایی در نمونه‌های گروه دو تحت تأثیر نفوذ آب شور از حاشیه شرقی آبخوان می‌باشد.



شکل ۴-۱۳ نمودار شولر نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه (گروه یک با EC کمتر از $2050 \mu\text{S/cm}$)

¹ Schoeller



شکل ۴-۱۴ نمودار شولر نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه (گروه دو با EC بیشتر از $2050 \mu\text{s/cm}$)

۴-۳-۲- تیپ و رخساره هیدروشیمیایی

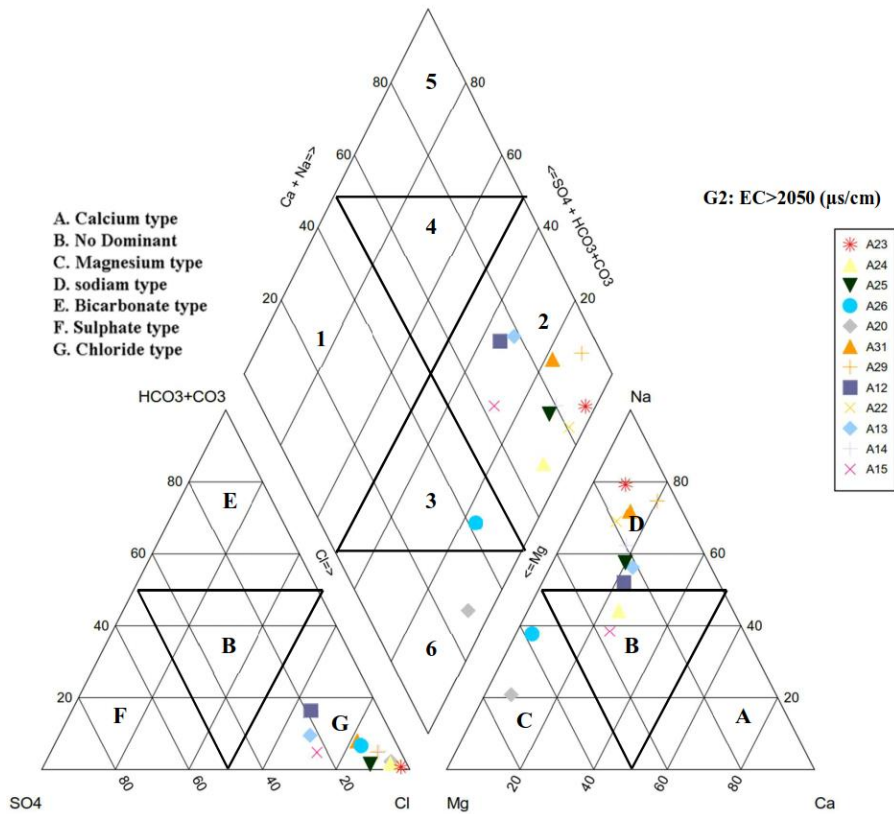
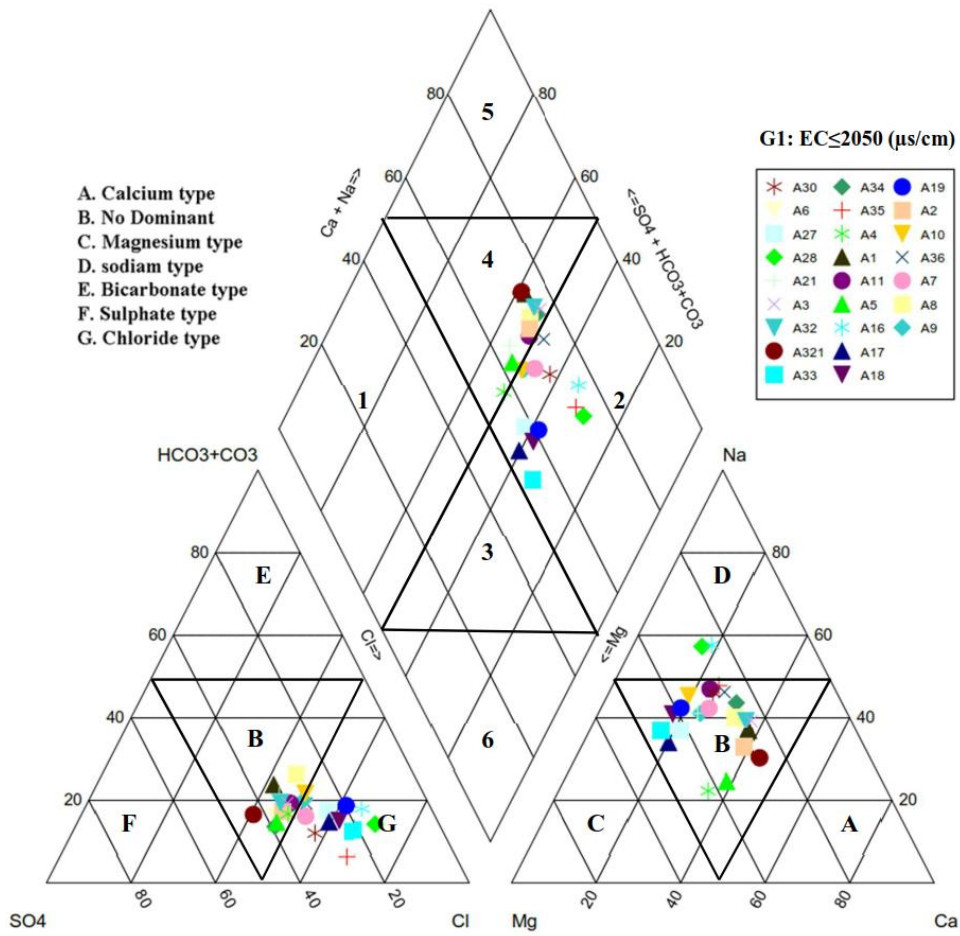
تعیین تیپ و رخساره هیدروشیمیایی نمونه‌های آبخوان ابرکوه در دو گروه با استفاده از نمودار پایپر^{۱۱} و بر اساس موقعیت نمونه‌های آب توسط نرم افزار AquaChem 2011.1 تعیین شد. موقعیت بیشتر نمونه‌های گروه اول (۲۵ نمونه با EC کمتر از $2050 \mu\text{s/cm}$) در مثلث آنیونی نمودار پایپر در شکل ۴-۱۵ نشان می‌دهد که حدود ۵۰٪ نمونه‌ها دارای تیپ کلروره و مابقی فاقد تیپ غالب هستند و در مثلث کاتیونی همین نمودار تیپ غالب وجود ندارد. اغلب این نمونه‌ها (۱۹ نمونه) از غرب آبخوان محل تغذیه (فراغه) تا بخش‌های مرکزی (شهر ابرکوه) واقع شده‌اند (شکل ۴-۱۶). مابقی نمونه‌ها (۶

¹ Piper trilinear diagram

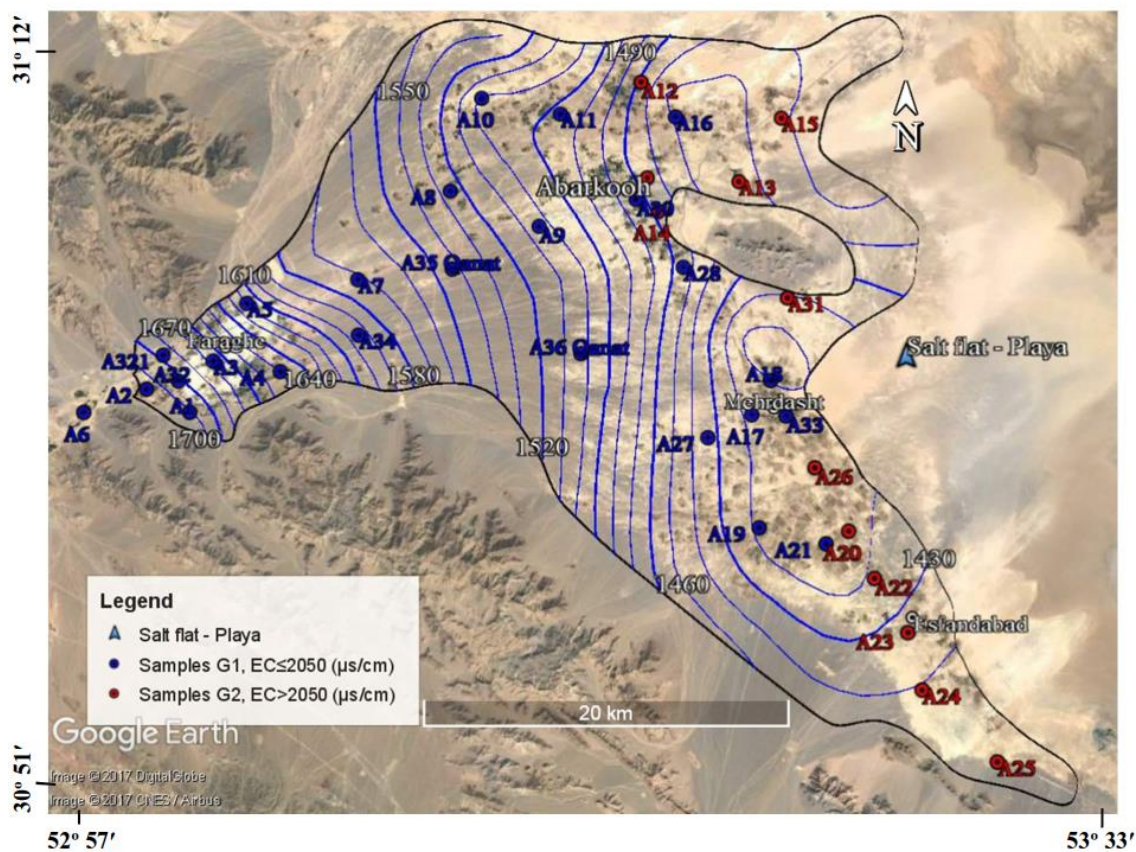
نمونه) در محدوده مهردشت در محل محدوده بسته افت سطح ایستابی آبخوان قرار دارند که تیپ آنها نزدیک به کلروره منیزیک است (شکل ۴-۱۶).

موقعیت نمونه‌های گروه دوم (نمونه‌های با EC بیشتر از $2050 \mu\text{s/cm}$) در نمودار پایپر (شکل ۴-۱۵) نشان می‌دهد که تیپ و رخساره غالب هیدروشمیایی (۷۵٪ نمونه‌های گروه دوم) کلروره سدیک می‌باشد. این نمونه‌ها در حاشیه شرقی آبخوان در محدوده شمال شرق و جنوب شرق (اسفند آباد) واقع شده‌اند و تحت نفوذ آب شور از سمت کفه ابرکوه می‌باشند (شکل ۴-۱۶). تعداد کمی از نمونه‌های گروه دوم که در محدوده افت سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند دارای تیپ و رخساره کلروره منیزیک هستند.

با توجه به نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های هر دو گروه (شکل ۴-۱۵)، در مجموع بیش از ۵۰٪ کل نمونه‌های برداشت شده در محدوده آبخوان ابرکوه دارای تیپ و رخساره غالب مشخصی نیستند. این موضوع احتمالاً ناشی از اختلاط آبها با منشأ تغذیه از ارتفاعات دولومیتی و آهکی غرب و نفوذ آب شور از کفه (پلایا) در شرق است. موقعیت نمونه‌ها در مثلث کاتیون نمودارهای پایپر هر دو گروه نشان می‌دهد که ترکیب هیدروشمیایی آب به صورت خط منحنی به موازات ضلع منیزیم و متمایل به رأس سدیم می‌باشد و احتمالاً تبادل یونی (معکوس) در برخی از نمونه‌ها رخ داده است (عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۴) که سهم جایگزینی سدیم به جای منیزیم در سطح رس‌ها بیشتر از کلسیم می‌باشد.



شکل ۴-۱۵ نمودارهای پایپر و موقعیت نمونه‌های گروه اول (G1) و دوم (G2) برداشت شده از آبخوان ابرکوه

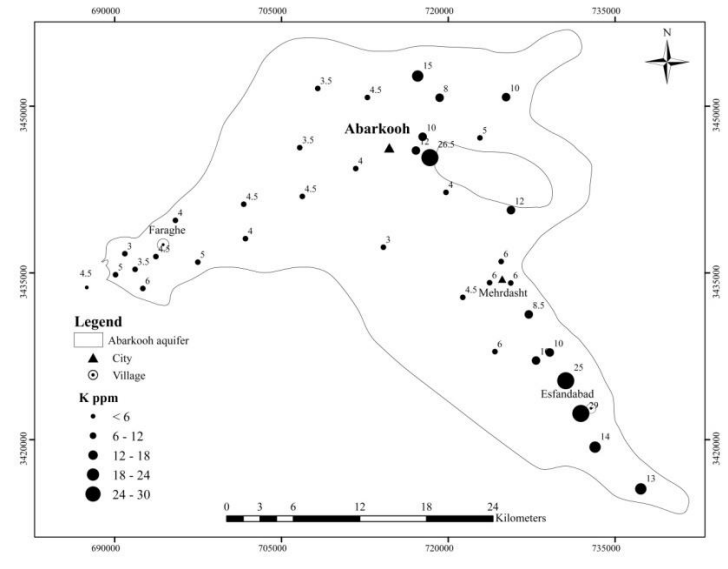
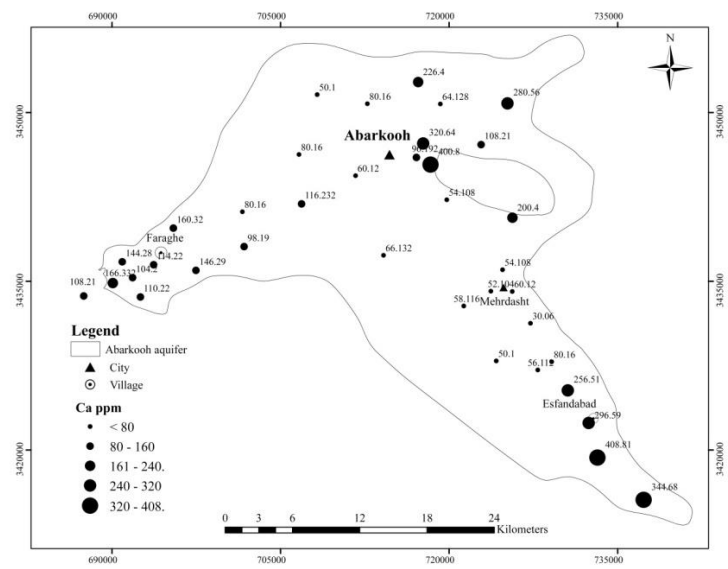
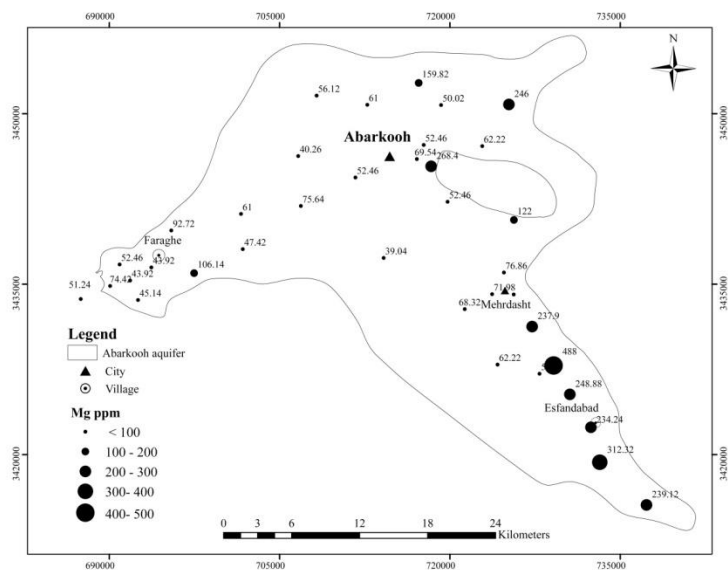


شکل ۴-۱۶ موقعیت نمونه‌های گروه اول (G1) و دوم (G2) برداشت شده از آبخوان ابرکوه (حداکثر تراز سطح ایستابی در فروردین ۱۳۹۴)

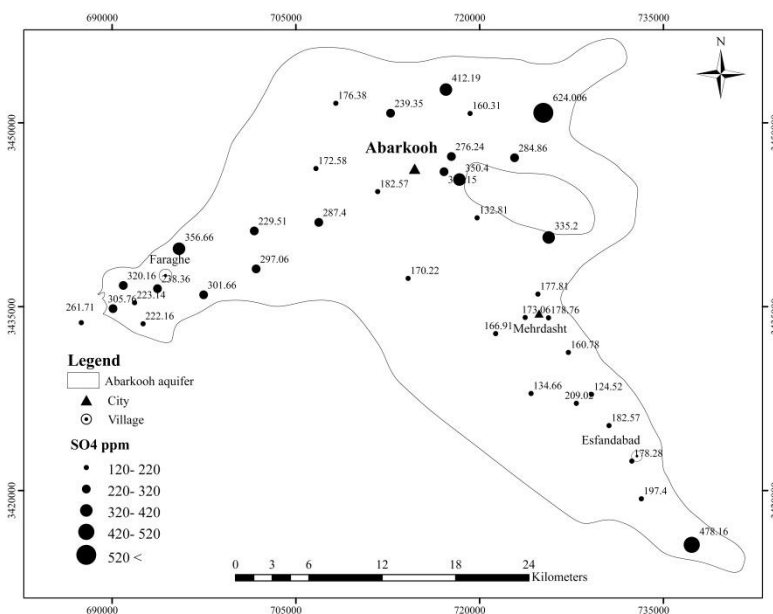
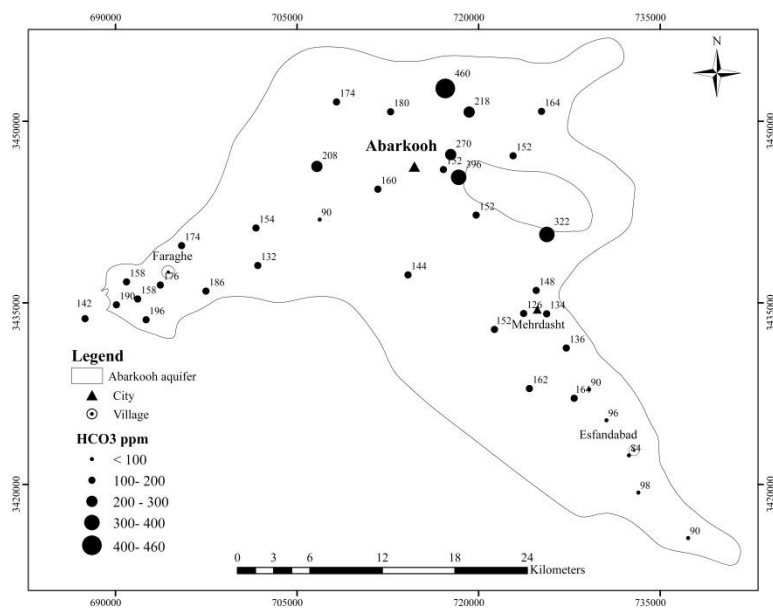
۴-۳-۳- بررسی تغییرات مکانی سایر یون‌های اصلی

تغییرات غلظت کاتیون‌های منیزیم، کلسیم و پتاسیم در محدوده آبخوان ابرکوه در شکل ۴-۱۶-۱ نشان می‌دهد که این تغییرات شبیه تغییرات هدایت الکتریکی و غلظت یون سدیم می‌باشد. در جنوب شرق و شمال شرق آبخوان غلظت یون‌های مذکور افزایش یافته است. منبع ورود کلسیم و منیزیم در غرب آبخوان سنگ‌های آهکی و دولومیتی هستند که تغذیه آبخوان را به عهده دارند. معمولاً غلظت سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم در آب‌های طبیعی شیرین به ترتیب کمتر از ۲۰۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر است (USGS 1964). میزان غلظت کاتیون‌های اصلی در غرب و محور مرکزی آبخوان با توجه به شرایط تغذیه و زمین‌شناسی تقریباً در حد آب شیرین طبیعی می‌باشد. اما در شرق آبخوان به دلیل شرایط زمین‌شناسی (رسوبات کویری و دانه‌ریز رسی و نمکی) و مجاورت با کفه نمکی (پلایا) ابرکوه و نفوذ آب شور به داخل آبخوان، غلظت کاتیون‌ها بیشتر از حد

آب شیرین طبیعی و تا چندین برابر آن است. غلظت بی‌کربنات در آب‌های طبیعی با منشأ دولومیت و سنگ آهک معمولاً کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است و غلظت سولفات در آب‌های طبیعی با منشأ اکسیداسیون کانسنگ‌های سولفیدی، ژئوپس و انیدریت به جز در موارد تأثیر زهاب‌های اسیدی معادن، معمولاً کمتر از ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (USGS 1964). تغییرات غلظت آنیون‌های بی‌کربنات و سولفات در محدودهٔ آبخوان ابرکوه در شکل ۴-۱۷ نشان می‌دهد که غلظت آنیون بی‌کربنات در تمام محدوده در حد آب‌های طبیعی با منشأ تغذیه از دولومیت و سنگ‌های آهکی غرب است و یک افزایش نسبی در شمال شرق آبخوان و شرق شهر ابرکوه دیده می‌شود. غلظت آنیون سولفات در محدودهٔ آبخوان ابرکوه، بیشتر در نقاط غرب و شرق آبخوان دارای افزایش نسبی و بیش از حد غلظت در آب‌های طبیعی است که در شمال شرق آبخوان به حداکثر می‌رسد.



شکل ۴-۱۶-۱ تغییرات غلظت کاتیون‌های منیزیم، کلسیم و پتاسیم در محدوده آبخوان ابرکوه

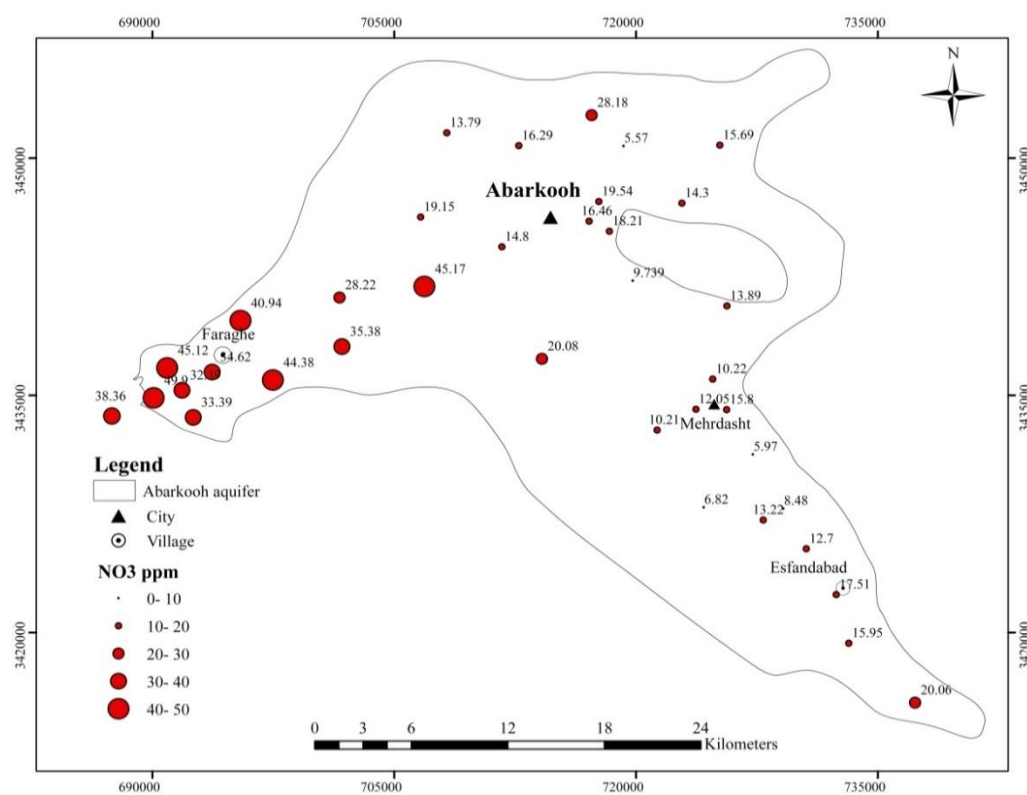


شکل ۴-۱۷ تغییرات غلظت آنیون‌های بی‌کربنات و سولفات در محدوده آبخوان ابرکوه

۴-۳-۴- بررسی تغییرات مکانی آنیون نیتрат

با توجه به جدول ۴-۱ دامنه تغییرات غلظت نیترات (NO_3^-) از ۵/۶ تا ۵۰ با متوسط ۲۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که کمتر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۵۰ mg/l) است (WHO 2011). حد طبیعی غلظت آنیون نیترات در آب‌های زیرزمینی معمولاً کمتر از ۱۰ mg/l و حداکثر تا ۱۰ mg/l

۱۵ می باشد (CDPH, 2010) و بیشتر از این مقدار ناشی از آلودگی‌های غیرطبیعی (انسانزاد) می- باشد (Mueller 1995). بیش از ۸۵٪ نمونه‌های آبخوان ابرکوه دارای غلظت بیش از ۱۰ mg/l هستند که بیشترین مقادیر آن (بیش از ۳۰ mg/l) در محدوده غرب آبخوان (فراغه)، محل ورودی و تغذیه آبخوان تا بخش مرکزی آن (شهر ابرکوه) واقع شده‌اند (شکل ۴-۱۸). عمق آب زیرزمینی در این محدوده نسبت مناطق دیگر آبخوان کمتر و سطح آب زیرزمینی بین ۱۵ تا بیش از ۳۰ متر متغیر است. طبق نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱-۶) غرب آبخوان از رسوبات سیلتی، ماسه‌ای و قلوه سنگی (درشت دانه) تشکیل شده که به سمت مرکز دشت از اندازه آنها کاسته می‌شود. کشاورزی در خاک مناسب این منطقه اغلب به صورت درخت‌کاری و نهال‌کاری به طور نسبتاً فشرده است. بنابراین می- توان گفت عامل اصلی افزایش نترات در این بخش با توجه به شرایط آب و خاک منطقه، فعالیت‌های گسترده کشاورزی است.

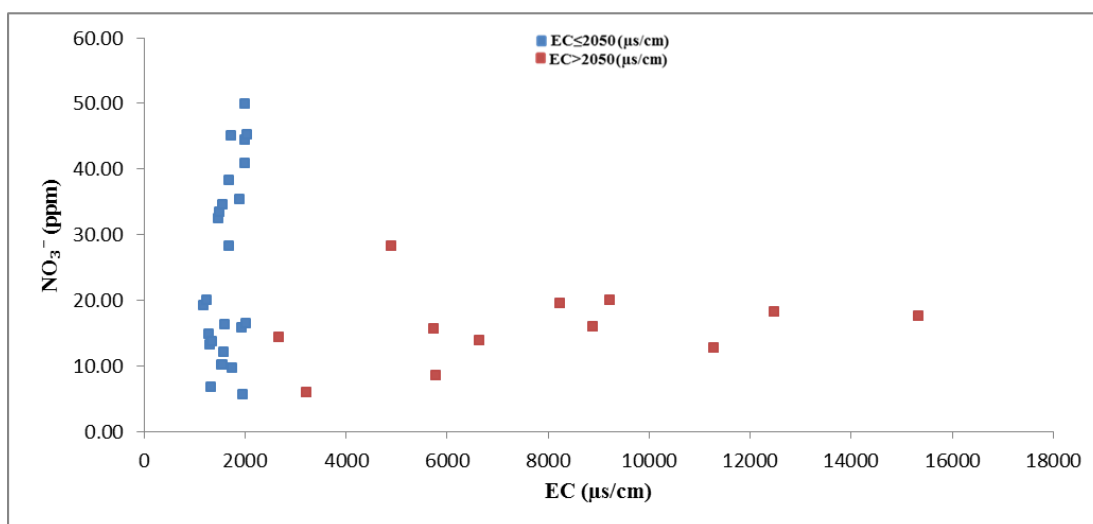


شکل ۴-۱۸ تغییرات غلظت نیون نترات در آبخوان ابرکوه

¹² The California Department of Public Health (CDPH) regulates nitrate as a drinking water contaminant.

۴-۳-۱- ارتباط آنیون نیترات با هدایت الکتریکی

ارتباط غلظت آنیون نیترات با هدایت الکتریکی، در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. تغییرات غلظت آنیون نیترات با هیچ یک از گروه‌های تفکیک شده بر اساس هدایت الکتریکی ارتباط معنی‌داری نشان نمی‌دهند. نمونه‌هایی که دارای غلظت بالاتری از نیترات (بیش از 20 mg/l) می‌باشند، بیشتر در گروه اول یعنی دارای هدایت الکتریکی کمتر از 2050 میکروزیمنس بر سانتیمتر هستند که در غرب تا نواحی مرکزی آبخوان واقع شده‌اند.

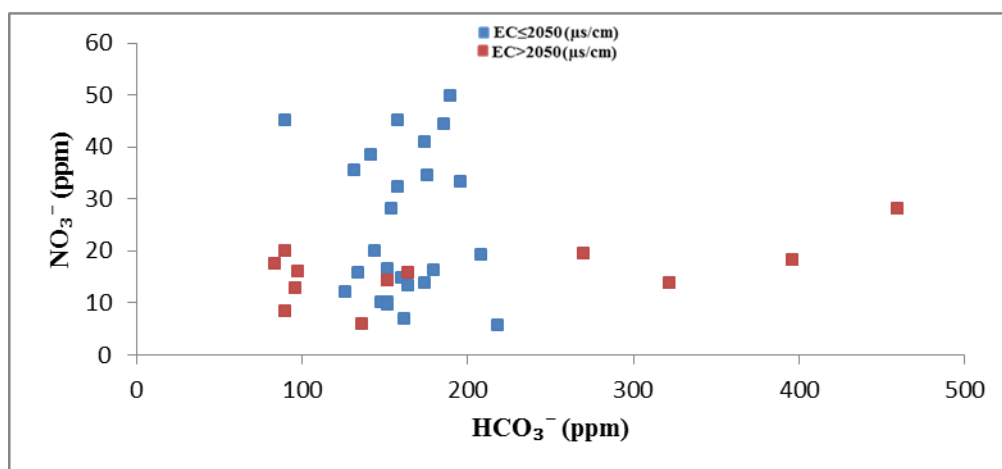
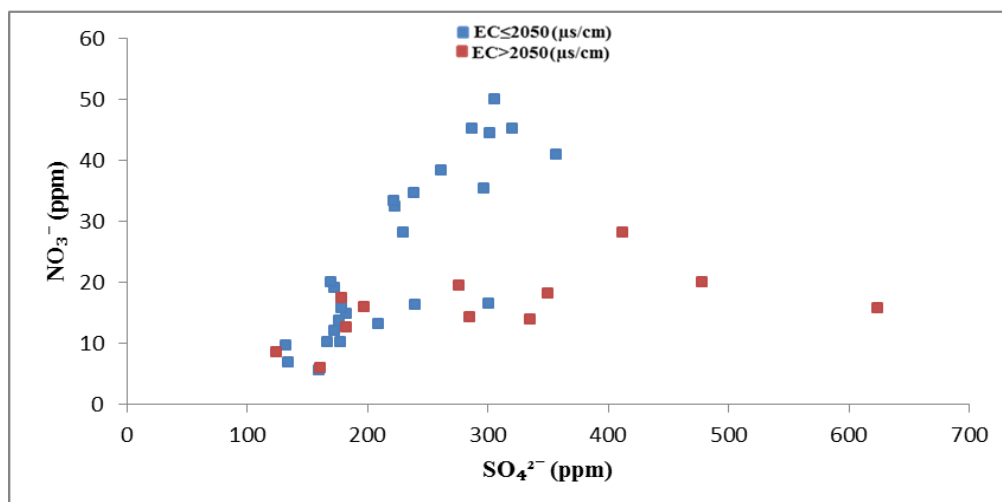
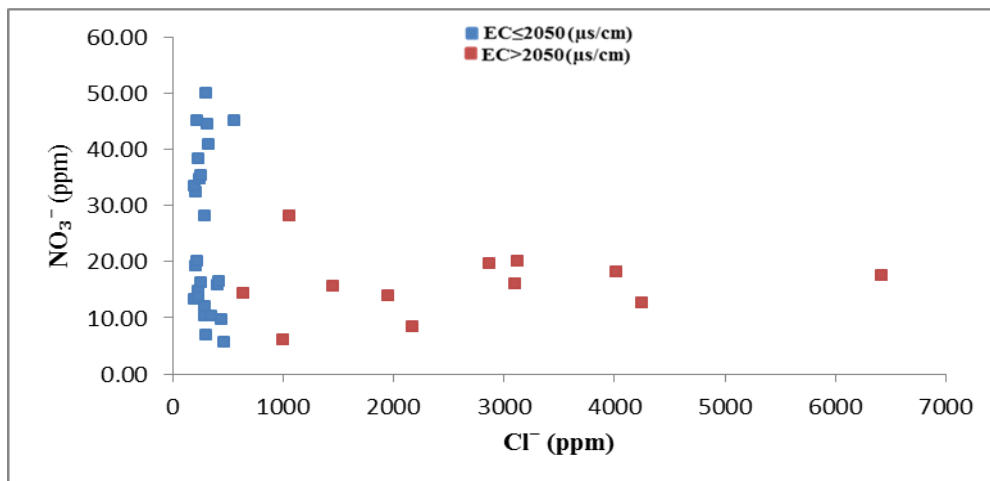


شکل ۴-۱۹ تغییرات غلظت نیترات در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه

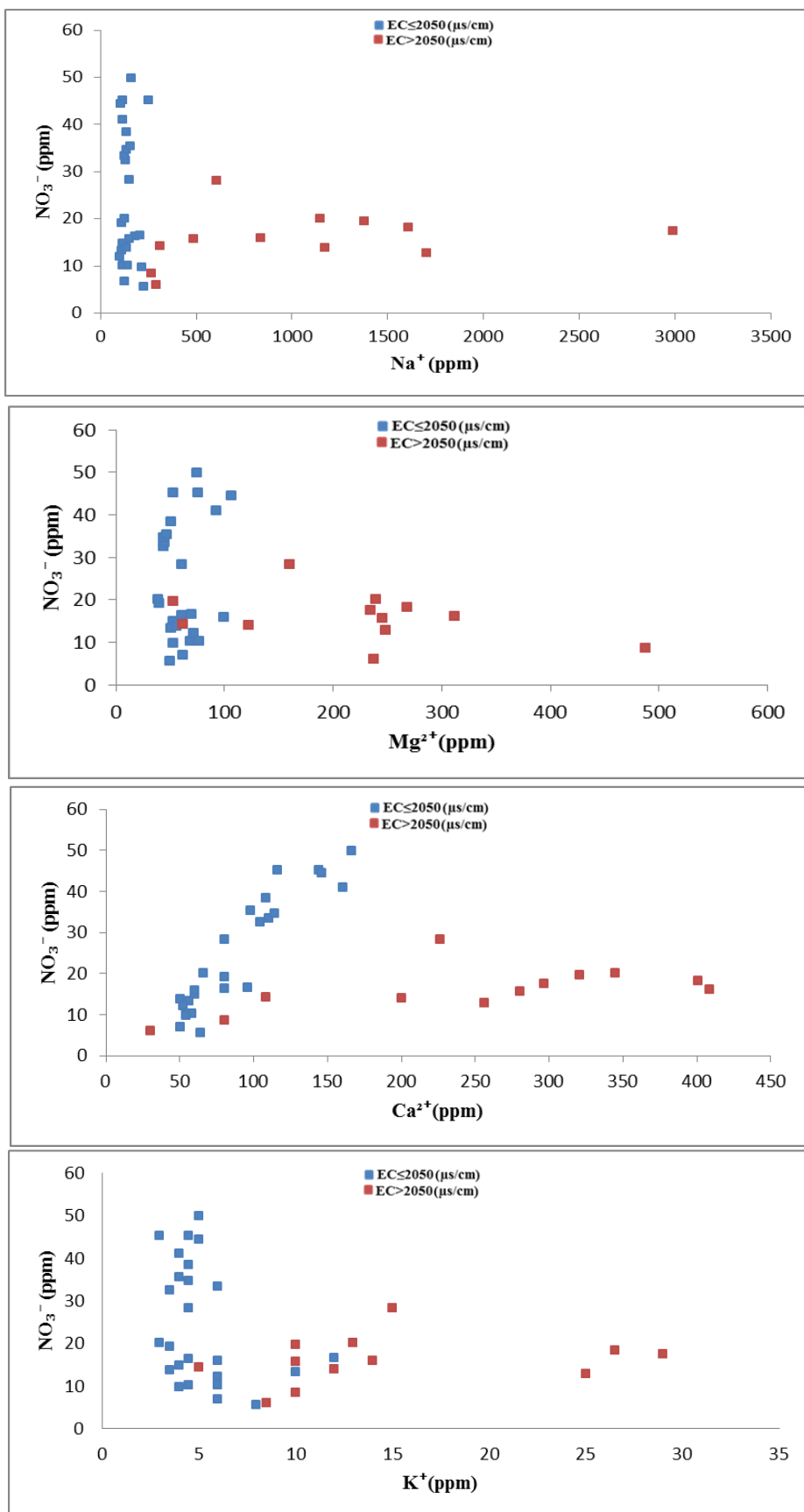
۴-۳-۲- ارتباط آنیون نیترات با یون‌های اصلی

نقشه پراکنش غلظت نیترات (شکل ۴-۱۸) در آبخوان ابرکوه نشان می‌دهد که نمونه‌های با غلظت بیش از 15 میلی گرم بر لیتر علاوه بر محدوده غرب تقریباً در اکثر گستره آبخوان دیده می‌شود. با توجه به دلایل ذکر شده در افزایش غلظت نیترات در غرب، به نظر می‌رسد این غلظت در اکثر نقاط آبخوان توزیع شده است. بررسی ارتباط تغییرات غلظت نیترات با یون‌های اصلی در آبخوان، با توجه به شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ نشان می‌دهد که جز آنیون سولفات و کاتیون کلسیم هیچ رابطه معنی‌داری بین غلظت نیترات و دیگر یون‌ها وجود ندارد. غلظت نیترات گروه اول نمونه‌ها رابطه خوبی با

غلظت یون کلسیم و سولفات دارند. رابطه نیترات با سولفات احتمالاً ناشی از فعالیت‌های گسترده کشاورزی در غرب آبخوان می‌باشد.



شکل ۴-۲ تغییرات غلظت نیترات در برابر غلظت آنیون‌های اصلی در آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۲۱ تغییرات غلظت نیترات در برابر غلظت کاتیون‌های اصلی در آبخوان ایرکوه

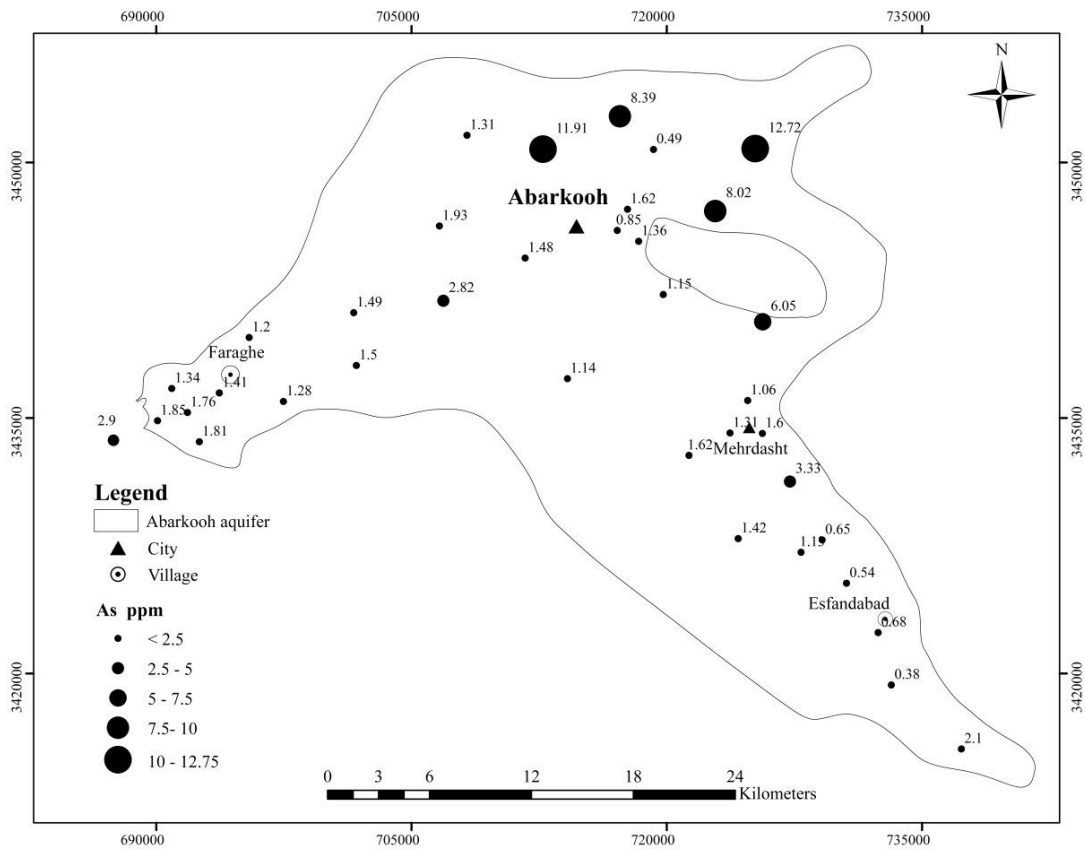
۴-۴- بررسی تغییرات مکانی فلزات سنگین منتخب

عناصر بالقوه سمی منتخب شامل آرسنیک، کادمیم و سرب طبق جدول ۴-۱ در نمونه‌های آبخوان ابرکوه اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج تجزیه نشان داد که به جز آرسنیک، حدود ۱۰ نمونه دارای مقدار غلظت قابل ثبت سرب و کادمیم هستند و بقیه نمونه‌ها فاقد مقدار غلظت قابل ثبت بوده و کمتر از مقدار نشان داده شده دستگاه (به ترتیب کمتر از ۱ و ۰/۱ میکروگرم بر لیتر برای سرب و کادمیم) غلظت دارند. نصف مقدار نشان داده شده دستگاه جهت سرب و کادمیم به عنوان کمترین مقدار غیر صفر جهت ترسیم نمودارها و بررسیهای آماری مورد استفاده قرار گرفت. کمترین، بیشترین و میانگین مقدار غلظت یون آرسنیک به ترتیب $0/38 \mu\text{g/l}$ ، $12/72 \mu\text{g/l}$ و $2/53 \mu\text{g/l}$ است. کمترین، بیشترین و میانگین غلظت یون کادمیم به ترتیب $0/06 \mu\text{g/l}$ ، $7/20 \mu\text{g/l}$ و $0/80 \mu\text{g/l}$ و برای غلظت یون سرب به ترتیب $0/88 \mu\text{g/l}$ ، $16/43 \mu\text{g/l}$ و $2/56 \mu\text{g/l}$ می‌باشد. میانگین غلظت یون‌های مذکور نمونه‌ها کمتر از بیشینه حد آلودگی (MCL) استانداردهای جهانی (آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا و سازمان بهداشت جهانی) در معرض کوتاه مدت هستند.

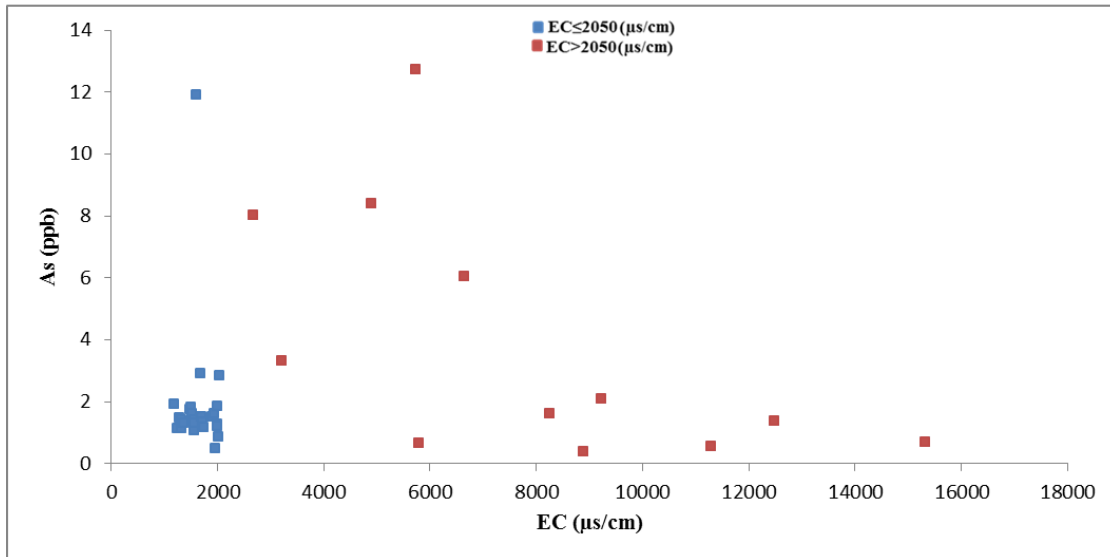
۴-۴-۱- آرسنیک

آرسنیک یک شبه فلز بالقوه سمی و متحرک تحت شرایط منابع آب زیرزمینی است. شکل ۴-۲۲ تغییرات مکانی غلظت فلز سنگین آرسنیک در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان ابرکوه را نشان می‌دهد، فقط غلظت دو نمونه یون آرسنیک واقع در شمال و شمال شرق آبخوان بیش از حد استانداردهای جهانی WHO ($10 \mu\text{g/l}$) و کمتر از حد مجاز EPA ($15 \mu\text{g/l}$) است. محتوای آرسنیک در آب‌های طبیعی (سطحی و زیرزمینی) غیرآلوده به فرآیندهای ژئوشیمیایی طبیعی بستگی دارد و غلظت آرسنیک به طور طبیعی در محدوده ۱ تا $10 \mu\text{g/l}$ تغییر می‌کند. افزایش غلظت آرسنیک در آب بیش از $10 \mu\text{g/l}$ احتمال آلودگی آن را نشان می‌دهد. معمولاً محتوای غلظت آرسنیک بیش از ۱۰ تا $30 \mu\text{g/l}$ در منابع آب در ارتباط با آب‌های برگشتی و رواناب‌های حاصل از فعالیت‌های

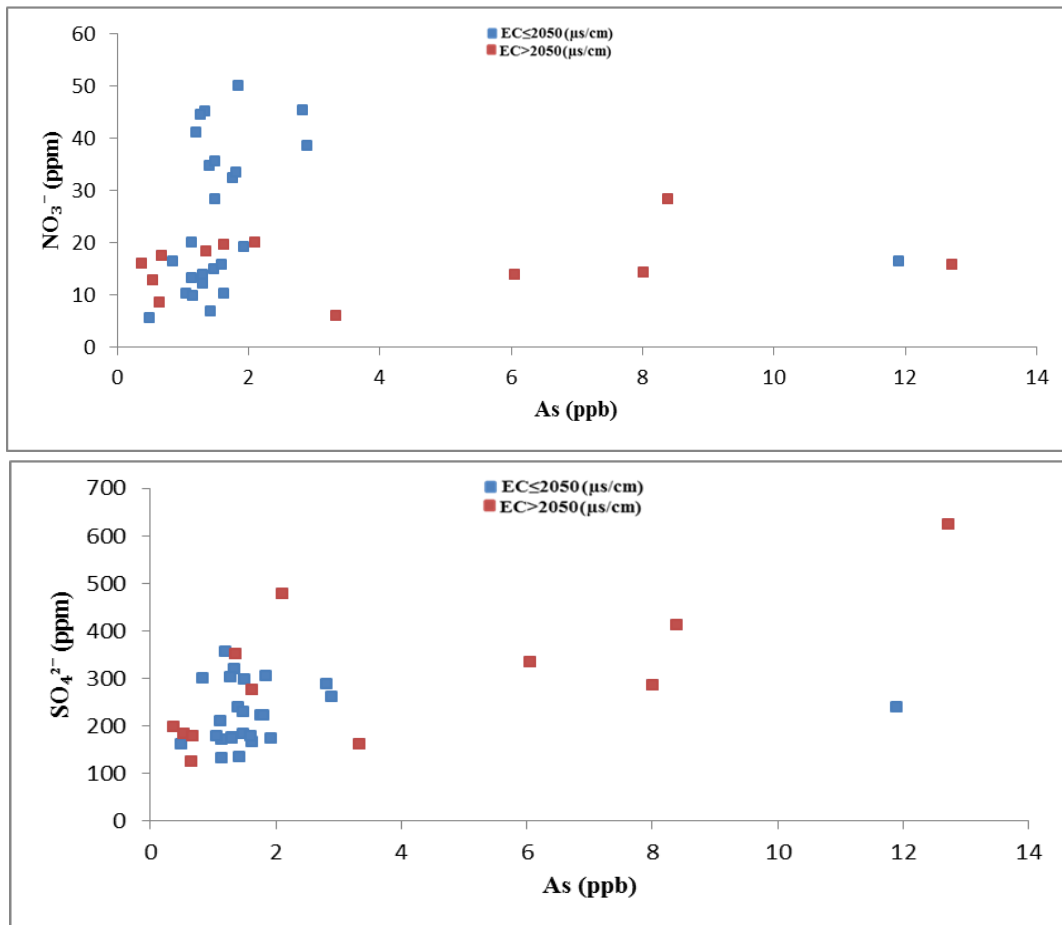
کشاورزی به جهت استفاده از سموم (آفت کش‌ها، علف کش‌ها و قارچ کش‌ها) و کودهای شیمیایی می‌باشند. آب‌های شیرین طبیعی و غیرآلوده معمولاً غلظت آرسنیک آن کمتر از $1 \mu\text{g/l}$ است که با افزایش شوری و املاح آن به ویژه در خصوص آب‌های زیرزمینی میانگین غلظت آرسنیک معمول آنها بین 2 تا $3 \mu\text{g/l}$ می‌باشد (Moore and Ramamoorthy 1984; Sharma 2015). با توجه به شکل ۴-۲۲ به جز پنج نمونه در شمال و شرق شهر ابرکوه (شمال شرق آبخوان)، تمام نمونه‌ها در حد غلظت $3 \mu\text{g/l}$ و کمتر از آن هستند. نمودار شکل ۴-۲۳ جهت بررسی ارتباط بین هدایت الکتریکی و غلظت یون آرسنیک ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد بین تغییرات غلظت آرسنیک و هدایت الکتریکی ارتباط معنی‌داری وجود ندارد. بیشترین غلظت آرسنیک اکثراً در نمونه‌های گروه دوم به لحاظ هدایت الکتریکی واقع شده‌اند. با توجه به نقش فعالیت‌های کشاورزی در آلودگی آبخوان ابرکوه می‌توان ارتباط غلظت آرسنیک را با غلظت یون‌های سولفات و نیترات مورد بررسی قرار داد. نمودارهای شکل ۴-۲۴ نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک در دو گروه نمونه‌ها در برابر غلظت یون‌های نیترات و سولفات، ارتباط معنی‌داری به جز در نمونه‌های گروه دوم وجود ندارد. افزایش غلظت آرسنیک در شمال شرق آبخوان با افزایش غلظت سولفات در این محدوده نسبتاً مرتبط و همراه است که هم منشأ بودن احتمالی آنها باید مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۴-۲۲ تغییرات غلظت آرسنیک در آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۲۳ تغییرات غلظت آرسنیک در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه

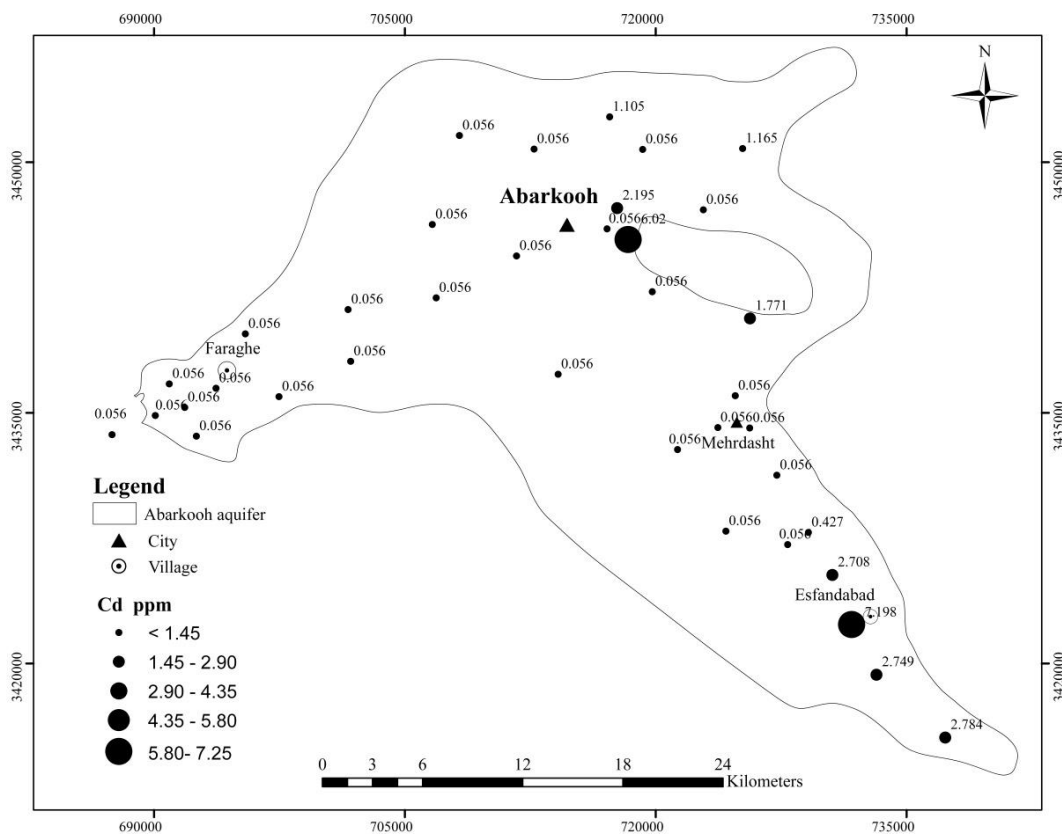


شکل ۴-۲۴ تغییرات غلظت آرسنیک در برابر غلظت یون‌های نیترات و سولفات

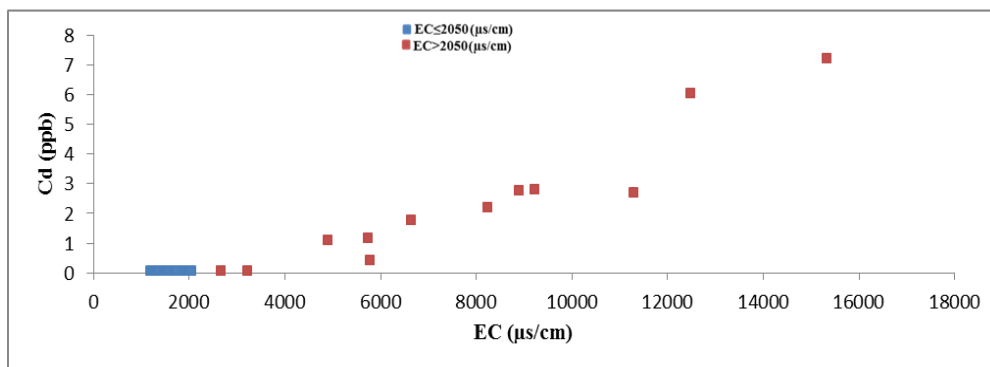
۴-۲-۴-۴- کادمیم

کاتیون کادمیم به عنوان یک فلز بالقوه سمی که در آب‌های طبیعی نسبتاً متحرک و به ندرت یافت می‌شود. سطح معمول غلظت کادمیم محلول در آب شیرین بین $0.01 \mu\text{g/l}$ تا $0.500 \mu\text{g/l}$ است و بیش از این مقدار احتمال آلودگی آب را افزایش می‌دهد. در آبخوان‌های نئوژن اروپا حداکثر غلظت کادمیم از $1 \mu\text{g/l}$ تجاوز نمی‌کند (Moore and Ramamoorthy 1984; Sharma 2015). حداکثر سطح غلظت کادمیم در آب شرب توسط سازمان بهداشت جهانی و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا به ترتیب $3 \mu\text{g/l}$ و $5 \mu\text{g/l}$ اعلام شده است. غلظت‌های کاتیون کادمیم بیش از $1 \mu\text{g/l}$ در حاشیه شرقی آبخوان (در شمال شرق و جنوب شرق) متمرکز شده‌اند که دو نمونه از این نمونه‌ها دارای غلظت بیش از استاندارد حداکثر سطح آلودگی در آب هستند، یکی از نمونه‌ها در شرق شهر

ابركوه و ديگري در محل اسفند آباد، جنوب شرق آبخوان واقع شده‌اند (شکل ۴-۲۵). افزايش غلظت كادميم در اين نقاط معمولاً با افزايش هدايت الكتريكي آب همراه است كه جهت بررسي اين موضوع نمودار تغييرات غلظت كادميم در برابر هدايت الكتريكي رسم مي‌شود. شكل ۴-۲۶ نشان مي‌دهد كه نمونه‌هاي گروه اول داراي مقدار کمتر از حد قابل ثبت غلظت كادميم هستند و آنهائي كه داراي مقدار هستند در گروه دوم قرار دارند و با افزايش هدايت الكتريكي مقدار غلظت كادميم افزايش يافته و رابطه مستقيم دارد. در ادامه تأثير افزايش هدايت الكتريكي بر افزايش غلظت كادميم در بررسي منشأ فلزات سنگين منتخب تحليل مي‌شود.



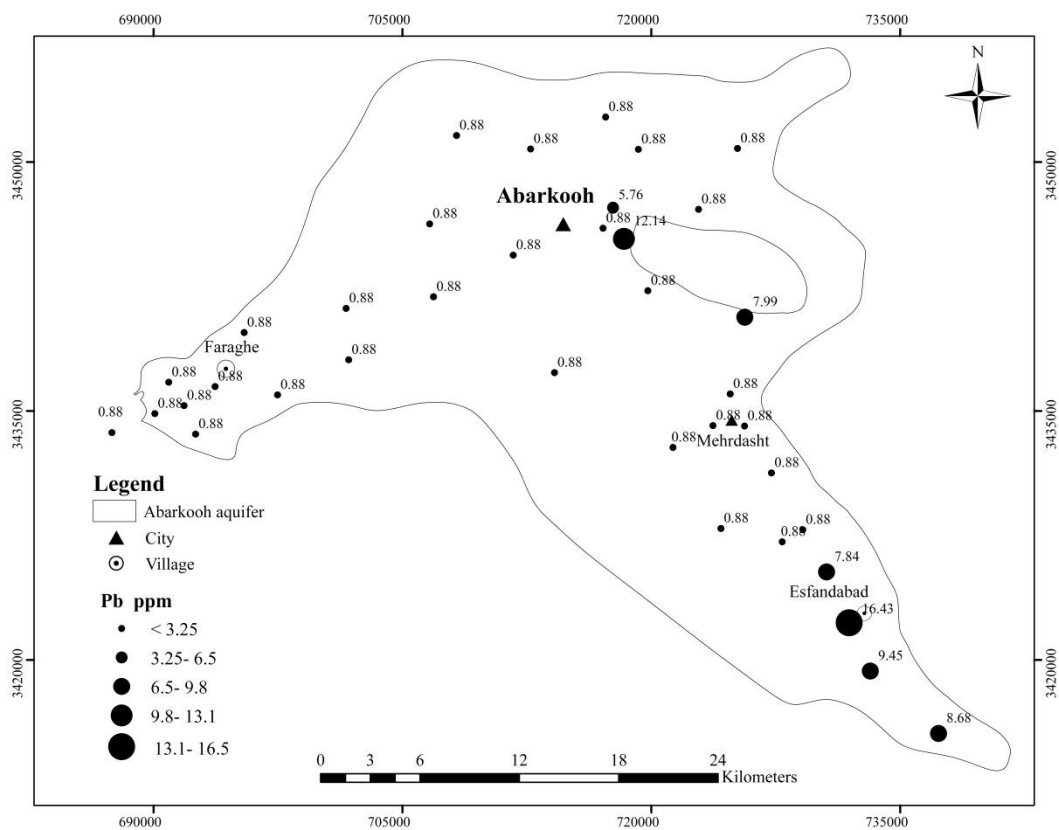
شکل ۴-۲۵ تغييرات غلظت كادميم در آبخوان ابركوه



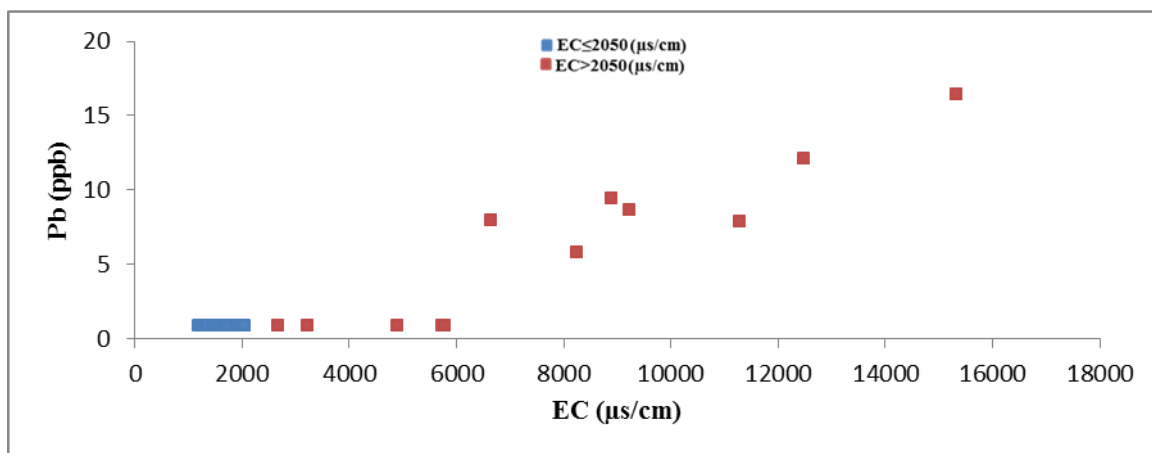
شکل ۴-۲۶ تغییرات غلظت کادمیم در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه

۴-۳-۳- سرب

کاتیون سرب به عنوان یک فلز سنگین بالقوه سمی در آب‌های طبیعی به مقدار بسیار کم وجود دارد. معمولاً غلظت سرب محلول در آب‌های شیرین غیر آلوده کمتر از $3 \mu\text{g/l}$ می‌باشد و بیش از این مقدار، احتمال آلودگی آب را می‌تواند فراهم سازد. میزان غلظت سرب در منابع آب سطحی نزدیک بزرگراه‌ها و شهرها بین $20 \mu\text{g/l}$ تا $90 \mu\text{g/l}$ بوده و همچنین در رودخانه‌های نزدیک به مناطق اصلی و شهرک‌های صنعتی و تخلیه‌ی باطله‌های مایع معدنی به بیش از $500 \mu\text{g/l}$ افزایش می‌یابد (Moore and Ramamoorthy 1984; Sharma 2015). حد استاندارد WHO و EPA برای غلظت سرب در آب آشامیدنی به ترتیب $10 \mu\text{g/l}$ و $15 \mu\text{g/l}$ است. با توجه به تغییرات غلظت سرب در شکل ۴-۲۷، تمام ۷ نمونه آب دارای مقدار قابل ثبت توسط دستگاه، غلظت کاتیون سرب در آنها از $5 \mu\text{g/l}$ تا $16 \mu\text{g/l}$ متغیر است که همانند کادمیم در حاشیه شرقی آبخوان (در شمال شرق و جنوب شرق) متمرکز شده‌اند، دو نمونه از این نمونه‌ها که دارای غلظت بیش از استاندارد WHO (حداکثر سطح آلودگی در آب) هستند، یکی در شرق شهر ابرکوه و دیگری در جنوب شرق آبخوان (اسفندآباد) واقع شده‌اند. پراکندگی و تغییرات غلظت سرب همانند غلظت کادمیم در محدوده آبخوان ابرکوه است و افزایش غلظت سرب هم در مکان‌هایی رخ داده که هدایت الکتریکی افزایش دارد. نمودار تغییرات غلظت سرب در برابر هدایت الکتریکی نشان می‌دهد همانند کادمیم، غلظت سرب هم در نمونه‌های گروه دوم با افزایش هدایت الکتریکی، افزایش می‌یابد و دارای رابطه مستقیم است (شکل ۴-۲۸).



شکل ۴-۲۷ تغییرات غلظت سرب در آبخوان ابرکوه



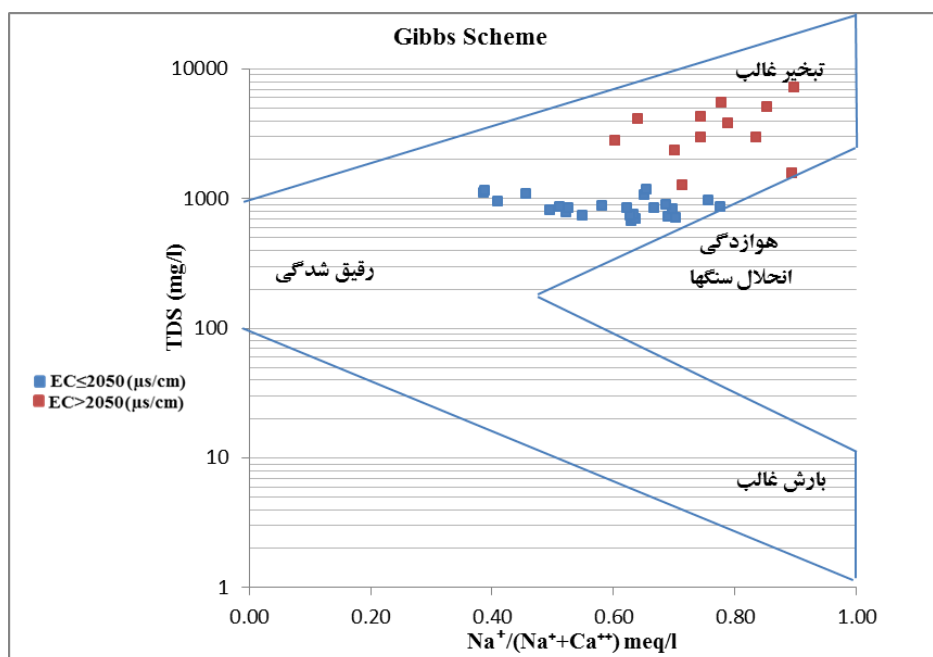
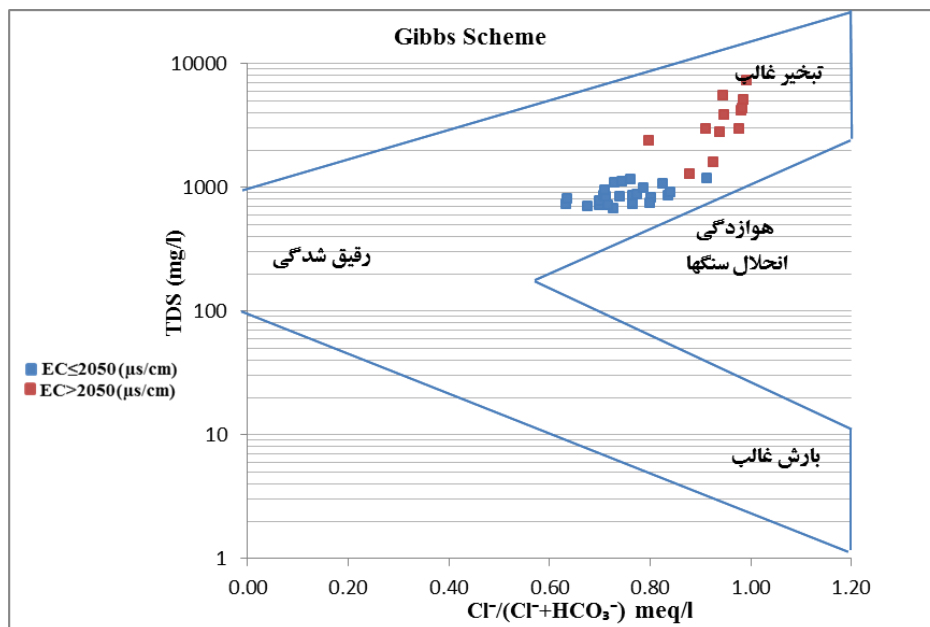
شکل ۴-۲۸ تغییرات غلظت سرب در برابر هدایت الکتریکی در آبخوان ابرکوه

۴-۵- بررسی منشأ یون‌ها و فلزات سنگین

۴-۵-۱- یون‌های اصلی

جهت بررسی منشأ یون‌های اصلی، ابتدا فرآیندهای ژئوشیمیایی کنترل کننده ترکیب شیمیایی آبخوان بررسی می‌شود. منابع یون‌های اصلی را می‌توان از طریق نمودار گیبس ارزیابی کرد. این نمودار که از ترسیم میزان کل جامدات حل شده (TDS) در مقابل نسبت‌های $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ و $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ حاصل می‌گردد، می‌تواند عوامل کنترل کننده طبیعی اثرگذار بر شیمی آب زیرزمینی را شناسایی کند. این عوامل شامل بارش‌های جوی، انحلال و هوازگی سنگ‌ها (ترکیب سنگ‌ها) و فرآیند تبخیر - تبلور می‌باشد (شکل ۴-۲۹). اگر در نمونه‌ها غلظت نسبت‌های مذکور بالا و TDS پایین باشد، بارش‌های جوی بیشترین تأثیر را روی شیمی آب‌های منطقه دارند. اگر غلظت این نسبت‌ها پایین و TDS بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد، نشان دهنده تأثیر فرآیند هوازگی سنگ‌ها است و در صورتی که مقادیر این دو پارامتر بالا باشد، عامل تبخیر و آب‌های شور کنترل کننده شیمی آب به شمار می‌روند (Gibbs 1970). موقعیت نمونه‌های آبخوان ابرکوه در نمودارهای گیبس نشان می‌دهد که نمونه‌های گروه اول که دارای هدایت الکتریکی کمتر از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر هستند، عمدتاً TDS آنها کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده و تحت تأثیر هوازگی و انحلال سنگ‌ها هستند. این نمونه‌ها بیشتر در غرب، محل ورودی و تغذیه آبخوان تا نواحی مرکزی آن (شهرستان ابرکوه) با منشأ از سنگ‌های دولومیتی و آهکی واقع شده‌اند (شکل ۴-۴). موقعیت نمونه‌های گروه دوم در نمودارهای گیبس که دارای هدایت الکتریکی بیش از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر هستند با TDS بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نشان دهنده تأثیر تبخیر یا نفوذ آب شور بر ترکیب شیمیایی و افزایش املاح آبخوان می‌باشد. این نمونه‌ها در حاشیه شرقی آبخوان (شمال شرق و جنوب شرق) با هدایت الکتریکی بیش از ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر واقع شده‌اند. با توجه به عمق سطح ایستابی در نقاط شرقی آبخوان که بیش از ۳۰ متر است، عامل

تبخیر در افزایش املاح آب ممکن نیست و همانطور که قبلاً هم ذکر شد این افزایش ناشی از نفوذ آب شور به آبخوان است.



شکل ۴-۲۹ نمودارهای گیبس، مکانیزم کنترل ترکیب شیمیایی آبخوان ابرکوه

با توجه به نقش انحلال سنگ‌ها (کانی‌ها) و نفوذ آب شور در ترکیب هیدروشمیایی آبخوان ابرکوه شاخص اشباع محاسبه و بررسی شد. این شاخص عبارتست از $SI = \log\left(\frac{IAP}{K_{sp}}\right)$ ^{۱۳} که در آن IAP میزان فعالیت یون^{۱۴} و K_{sp} ثابت تعادل^{۱۵} است. اگر آب در حالت اشباع باشد، میزان شاخص اشباع صفر یا نزدیک به صفر می‌باشد، اگر مقدار این شاخص مثبت باشد، آب در حالت فوق اشباع و تمایل به ته نشینی کانی‌ها دارد و اگر منفی باشد، آب تحت اشباع بوده و تمایل به انحلال کانی‌ها وجود دارد (Eby 2004; Soltani 2017). جدول ۲-۴ متوسط شاخص اشباع کانی‌های انحلال‌پذیر شامل هالیت، انیدریت، ژپس، کلسیت، آراگونیت و دولومیت را در همه نمونه‌ها و نمونه‌های گروه اول و دوم نشان می‌دهد. آبخوان ابرکوه نسبت به کانی‌های کربناته (کلسیت، آراگونیت و دولومیت) در حد اشباع و نسبت به کانی‌های دیگر تحت اشباع می‌باشد. هالیت بیشترین تمایل به انحلال یا انحلال‌پذیرترین کانی در آبخوان می‌باشد. با افزایش هدایت الکتریکی در گروه دوم نمونه‌ها نسبت به گروه اول، متوسط شاخص اشباع افزایش می‌یابد، به طوری که این شاخص در خصوص کانی‌های کربناته به ویژه دولومیت به حداکثر می‌رسد. انحلال‌پذیری هالیت در نمونه‌های گروه دوم نسبت به گروه اول کاهش یافته است.

جدول ۲-۴ متوسط شاخص اشباع کانی‌های انحلال‌پذیر در آبخوان ابرکوه

متوسط شاخص اشباع (SI)						نمونه‌های آب
دولومیت	آراگونیت	کلسیت	ژپس	انیدریت	هالیت	
-۰/۵۹	-۰/۵۴	-۰/۴۰	-۱/۴۰	-۱/۶۲	-۶/۰۰	گروه اول EC≤2050(μs/cm)
-۰/۰۶	-۰/۳۴	-۰/۱۹	-۱/۲۹	-۱/۵۱	-۴/۴۵	گروه دوم EC>2050(μs/cm)
-۰/۴۲	-۰/۴۸	-۰/۳۳	-۱/۳۷	-۱/۵۹	-۵/۵	کل

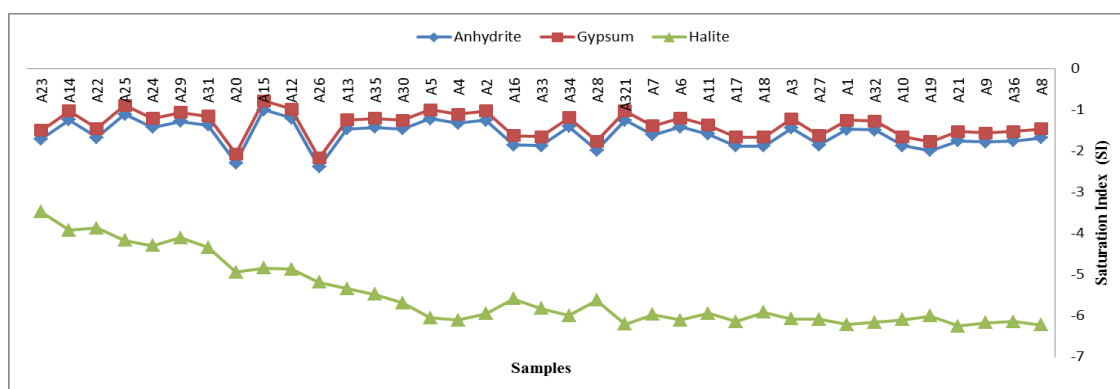
جهت بررسی تغییرات شاخص اشباع کانی‌های انحلال‌پذیر در نمونه‌های آبخوان ابرکوه نمودارهای شکل ۳۰-۴ و ۳۱-۴ بر اساس افزایش هدایت الکتریکی نمونه‌ها رسم شده است. شکل ۳۰-۴ نشان

¹ Saturation Index (SI)

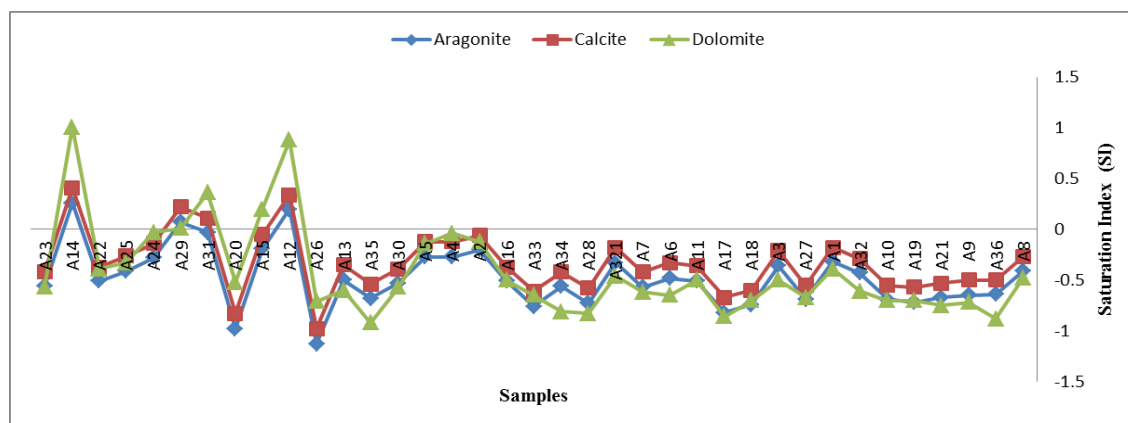
² Ion Activity Product (IAP)

³ Equilibrium constant (equilibrium solubility product)

می‌دهد که شاخص اشباع هالیت با افزایش هدایت الکتریکی (نمونه‌های گروه دوم از نمونه A35 به بعد) با شیب زیاد افزایش و به سمت کاهش انحلال آن نزدیک می‌شود. نمونه‌هایی که شاخص اشباع هالیت در آنها بیشترین مقدار است در جنوب شرق آبخوان واقع شدند و تحت نفوذ آب شور می‌باشند. شاخص اشباع کانی‌های ژپس و انیدریت در نمونه‌های آبخوان تغییری را نشان نمی‌دهند و آبخوان نسبت به این دو کانی تحت اشباع است. در شکل ۴-۳۱ نمودار تغییرات شاخص اشباع کانی‌های دولومیت، کلسیت و آراگونیت نشان می‌دهد که اغلب نمونه‌ها نسبت به این کانیها دارای انحلال کمتر و نزدیک به اشباع و در برخی از نمونه‌های بعد از نمونه A35 ($EC > 2050 \mu\text{s/cm}$) اشباع یا فوق اشباع هستند. نمونه‌های فوق اشباع از کانی‌های کربناته بیشتر در شرق شهر ابرکوه واقع شده‌اند. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش قدرت یونی آب و همچنین ایجاد شرایط مناسب برای رسوب کانی‌های کربناته در اثر افزایش املاح در آب زیرزمینی باشد.

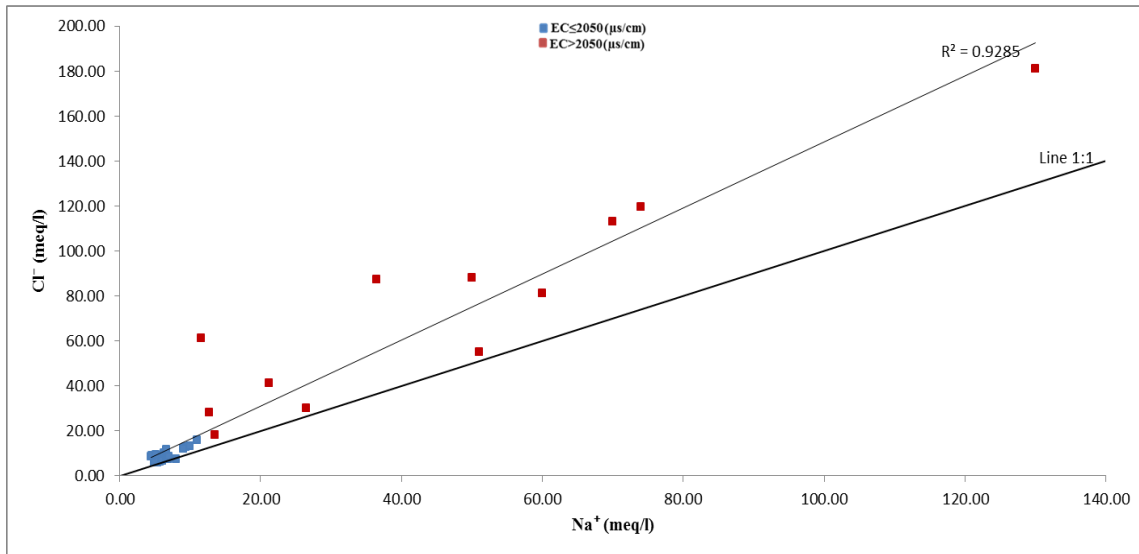


شکل ۴-۳۰ نمودار تغییرات شاخص اشباع کانی‌های هالیت، ژپس و انیدریت در نمونه‌های آبخوان ابرکوه

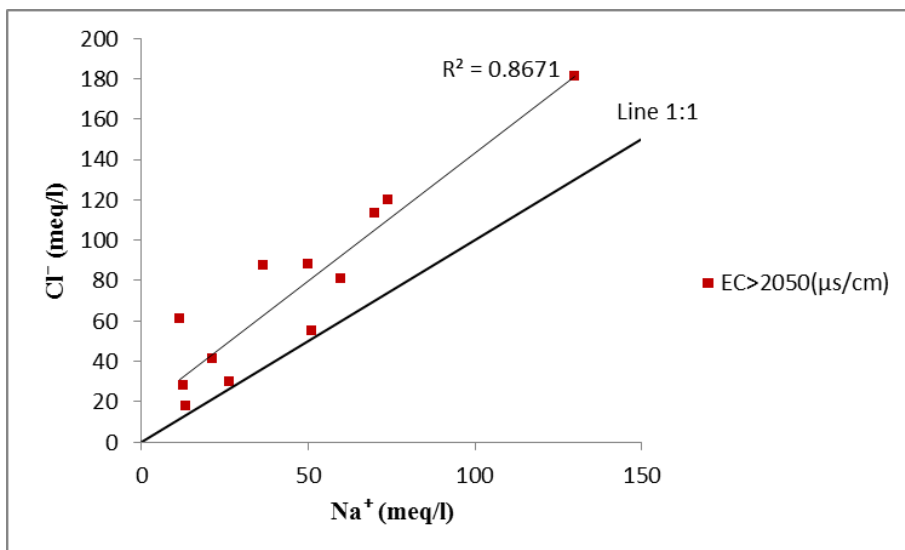
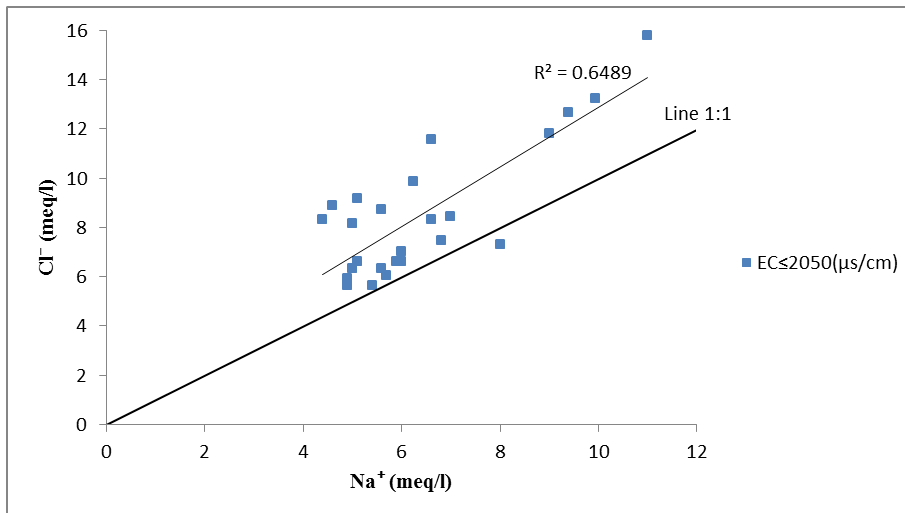


شکل ۴-۳۱ نمودار تغییرات شاخص اشباع کانی‌های دولومیت، کلسیت و آراگونیت در نمونه‌های آبخوان ابرکوه

برای تعیین منشأ یون‌ها در آب و واکنش‌های موجود در آبخوان ابرکوه از برخی نسبت‌های یونی و نمودارهای پراکندگی (Scatter Plot) استفاده شد. همبستگی بالا بین یون‌های غالب کلر و سدیم و رابطه خوب آنها با هدایت الکتریکی نشان از منشأ واحد یون‌های غالب است و برابری غلظت‌های کلر و سدیم ناشی از انحلال کانی هالیت در آب زیرزمینی می‌باشد (Tlili-Zrelli et al. 2012). جهت بررسی بیشتر، رابطه بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم نمونه‌های آبخوان ابرکوه رسم شده است (شکل ۴-۳۲). این نمودار نشان می‌دهد که در هر دو گروه تقریباً اغلب نمونه‌ها در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که بیانگر کمبود یون سدیم در برابر یون کلر می‌باشد. در مجموع با توجه به ضریب همبستگی نزدیک به یک بین یون کلر و سدیم و مواردی که قبلاً در تغییرات غلظت یون‌های اصلی و تعیین تیپ هیدروشیمیایی نمونه‌ها ذکر شد، کاهش یا کمبود یون سدیم در مقابل یون کلر در کمتر از نصف نمونه‌ها وجود دارد. جهت بررسی دقیق در تعیین منشأ رابطه بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم به طور مجزا برای هر دو گروه نمونه‌ها رسم گردید (شکل ۴-۳۳). رابطه خطی و ضریب همبستگی گروه دوم نسبت به گروه اول بیشتر است، یعنی نمونه‌های دارای هدایت الکتریکی کمتر از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر کمبود یا کاهش یون سدیم در برابر کلر آنها بیشتر و شاخص است. با توجه به شکل‌های ۴-۴ و ۴-۱۶ بیشتر نمونه‌های گروه اول در غرب (محل تغذیه تا بخش مرکزی آبخوان) واقع شده‌اند و منشأ آنها ارتفاعات آهکی و دولومیتی غرب آبخوان است. تعدادی از این نمونه‌ها در شرق آبخوان و در محدوده شهر مهربدشت و در محل مخروط افت سطح ایستابی تحت تأثیر نفوذ آب شور از سمت کفه نمکی به داخل آبخوان هستند (شکل ۴-۳). به نظر می‌رسد فرآیند تبادل کاتیونی (معکوس) سبب خروج یا مصرف کاتیون سدیم از آب و جذب روی سطح رس‌ها شده و کاتیون‌های دیگر از جمله منیزیم جایگزین آن شده است. نمونه‌های گروه دوم در حاشیه شرقی آبخوان (شمال شرق و جنوب شرق) تحت تأثیر نفوذ آب شور هستند که دارای منشأ طبیعی و بیشتر ناشی از انحلال کانی هالیت در مجاورت کفه و پلایای کویر ابرکوه است.



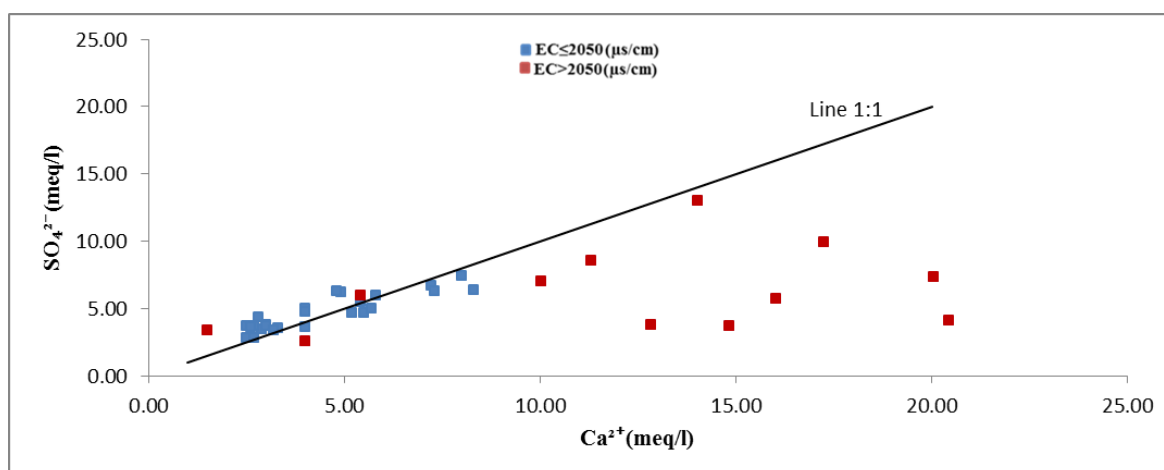
شکل ۴-۳۲ رابطه (خطی) بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم در نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۳۳ رابطه (خطی) بین تغییرات یون‌های کلر و سدیم در دو گروه نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ابرکوه

جهت درک بیشتر فرآیندهای غالب کنترل کننده ترکیب شیمیایی آبخوان ابرکوه برخی از نسبت‌های یونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی اگر نسبت یونی $Ca^{2+}/Ca^{2+}+SO_4^{2-}$ کمتر از ۰/۵ و نسبت یونی Na^+/Na^++Cl^- بیشتر از ۰/۵ باشد، فرآیند تبادل یونی عادی (مستقیم) غالب است (Hounslow 1995). مقدار نسبت یونی اول برابر ۰/۵۳ و مقدار نسبت یونی دوم برابر ۰/۴۱ می‌باشد که نشان دهنده عدم وجود یون سدیم اضافی (کمبود سدیم) در آبخوان ابرکوه است. بنابراین تبادل یونی به صورت معکوس ایجاد شده است.

رابطه یونهای کلسیم و سولفات در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است. اغلب نمونه‌های گروه دوم ($EC > 2050 \mu s/cm$) در زیر خط ۱:۱ واقع شده‌اند و دارای کلسیم اضافی در مقابل یون سولفات هستند. برابری یونهای کلسیم و سولفات نشان دهنده انحلال ژپس و انیدریت در آب است. مقدار نسبت یونی $Ca/(Ca+SO_4)$ برابر ۰/۵۳ و مقدار نسبت یونی $Mg/(Mg+Ca)$ هم برابر ۰/۵۵ است. بنابراین غیر از منشأ انحلال کانی ژپس می‌توان منشأ دیگری هم در نظر گرفت (فاریابی و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به این موضوع می‌توان گفت تبادل یونی (معکوس) در مقدار کمی از نمونه‌ها رخ داده است که سهم یون منیزیم در تبادل با یون سدیم بیشتر است (شکل ۴-۱۵).

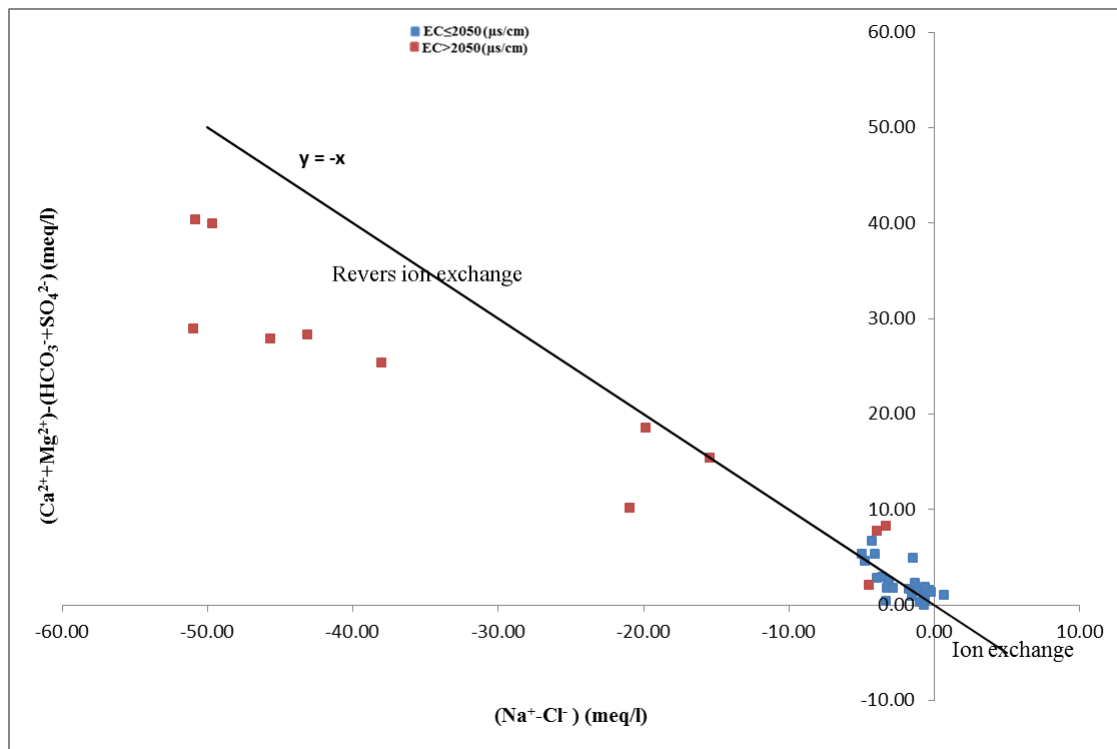


شکل ۴-۳۴ رابطه (خطی) بین تغییرات یونهای سولفات و کلسیم در نمونه‌های آبخوان ابرکوه

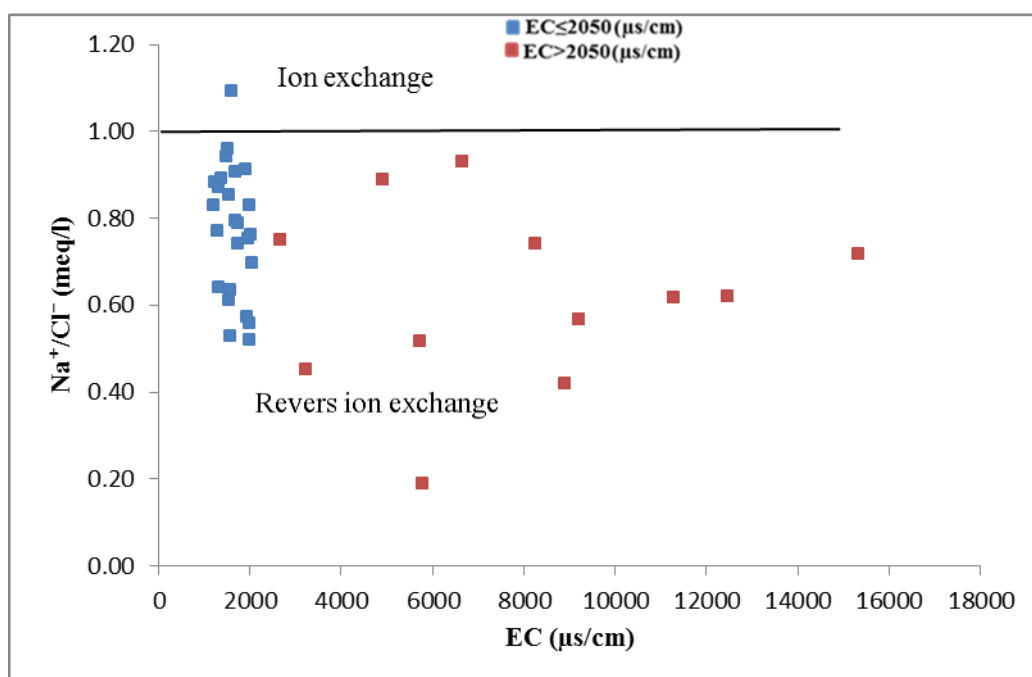
جهت بررسی بیشتر و دقیق‌تر رخداد فرایند تبادل یونی عادی و معکوس در آبخوان مورد مطالعه، نمودارهای مرتبط با تبادل یونی رسم می‌شود. در شکل ۴-۳۵، نمودار اختلاف غلظت سدیم و کلر $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ در برابر حاصل غلظت $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ نشان داده شده است. در این نمودار نمونه‌هایی که نزدیک به مقدار صفر و روی محور x قرار می‌گیرند، تحت تأثیر تبادل یونی نیستند. علاوه بر این، اگر انحلال کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس به طور سازگار روی دهد و تبادل یونی صورت نگیرد، در آن صورت مقدار $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ نیز نزدیک به صفر خواهد شد و نمونه‌های آبی که تحت تأثیر تبادل یونی هستند در طول خط با شیب ۱- قرار می‌گیرند (Tlili-Zrelli et al. 2013; Zaidi et al. 2015). در نمودار شکل ۴-۳۵ اغلب نمونه‌ها نزدیک به مقدار صفر در محور طول و عرض واقع شده‌اند و تعداد کمی از نمونه‌ها (مربوط به گروه دوم) که در امتداد خط با شیب ۱- پراکنده شده‌اند تحت تأثیر تبادل یونی معکوس می‌باشند. در صورتی که نمودار دو متغیره نسبت Na/Cl در برابر هدایت الکتریکی (EC) رسم شود (شکل ۴-۳۶)، نمونه‌هایی که بالای خط نسبت $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1$ واقع شوند، منشأ دوگانه دارند، یعنی علاوه بر انحلال کانی هالیت، افزایش سدیم تحت تأثیر تبادل کاتیونی مستقیم (عادی) قرار گرفته است (Zaidi et al. 2015). با توجه به این نمودار تقریباً تمام نمونه‌ها زیر خط مذکور واقع شده‌اند که منشأ واحد دارند. در هر دو گروه از نمونه‌ها، نسبت Na^+/Cl^- همچنان کمتر از یک و در برخی موارد با افزایش شوری این نسبت کاهش یافته است که نشان از کاهش یون سدیم نسبت یون کلر می‌باشد. فرآیند تبادل یونی، به صورت عادی و معکوس رخ می‌دهد. در تبادل عادی بر اساس رابطه (۴-۱) یون‌های کلسیم و منیزیم موجود در آب جایگزین یون سدیم از سطح یک کانی (X) مانند رس شده و یون سدیم وارد آب می‌شود. در حالت عکس یون سدیم جذب سطحی یک کانی شده و به جای آن یون کلسیم وارد آب می‌شود (Montcoudiol et al. 2014).



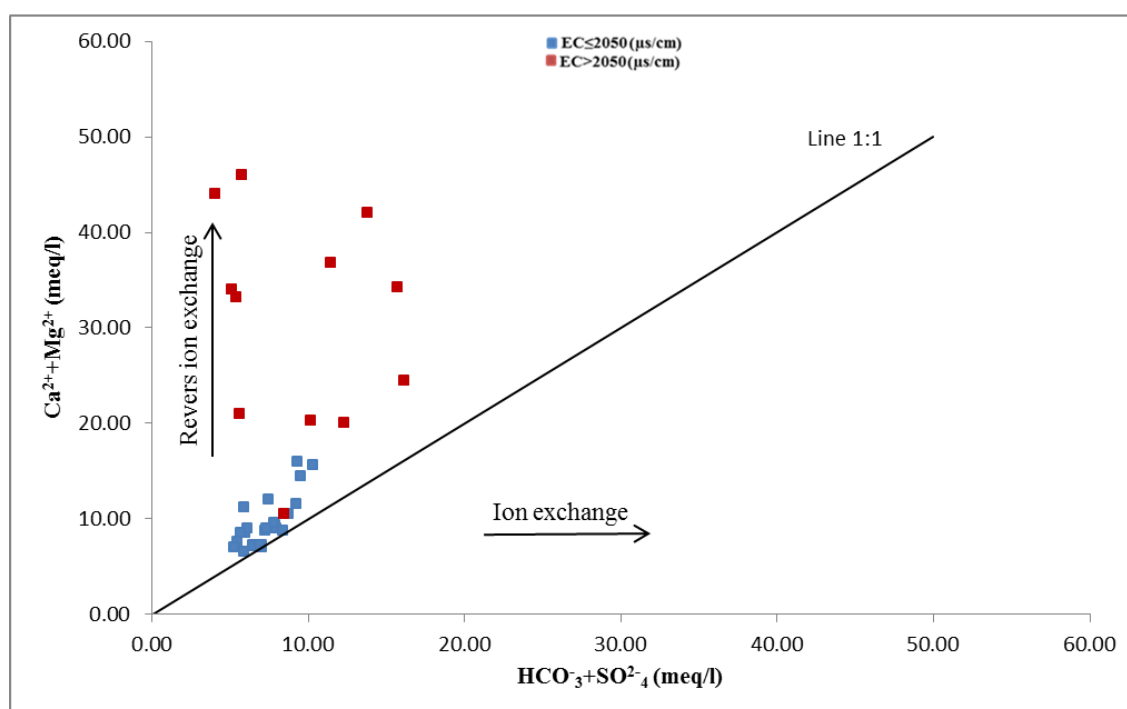
در صورتی که تغییرات غلظت $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در برابر غلظت $HCO_3^-+SO_4^{2-}$ رسم شود (شکل ۴-۳۷)، خط ۱:۱ نشان دهنده فرایند انحلال کلسیت، دولومیت و ژئپس می‌باشد. نمونه‌هایی که بالاتر از این خط قرار گرفته‌اند، تحت تأثیر فرایند تبادل یونی معکوس و آنهایی که پایین‌تر از این خط قرار گرفته‌اند تحت تأثیر فرایند تبادل یونی (عادی) هستند (Tlili-Zrelli et al. 2013). شکل ۴-۳۷ نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های گروه اول آبخوان ابرکوه در امتداد و روی خط ۱:۱ و تمام نمونه‌های گروه دوم بالاتر از این خط قرار گرفته‌اند، بنابراین تحت انحلال کانی‌های مذکور و فرایند تبادل یونی معکوس هستند.



شکل ۴-۳۵ تغییرات غلظت Na^+-Cl^- در برابر غلظت $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ نمونه‌های آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۳۶ تغییرات نسبت غلظت Na^+/Cl^- در برابر EC نمونه‌های آبخوان ابرکوه



شکل ۴-۳۷ تغییرات غلظت $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ در برابر غلظت $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ نمونه‌های آبخوان ابرکوه

در مجموع می‌توان گفت مهمترین فرآیند طبیعی کنترل کننده هیدروژئوشیمیایی آبخوان ابرکوه انحلال کانی‌های هالیت، کلسیت، دولومیت (با تغذیه از ارتفاعات غرب) و ژپس و همچنین نفوذ آب شور (از سمت کفه نمکی شرق) می‌باشد. تبادل کاتیونی معکوس در حاشیه شرق آبخوان با جایگزینی

سدیم در سطح رس‌ها و آزاد شدن منیزیم به نسبت بیشتر از کلسیم در آب فرایند موثر دیگر در شیمی آبخوان ابرکوه می‌باشد.

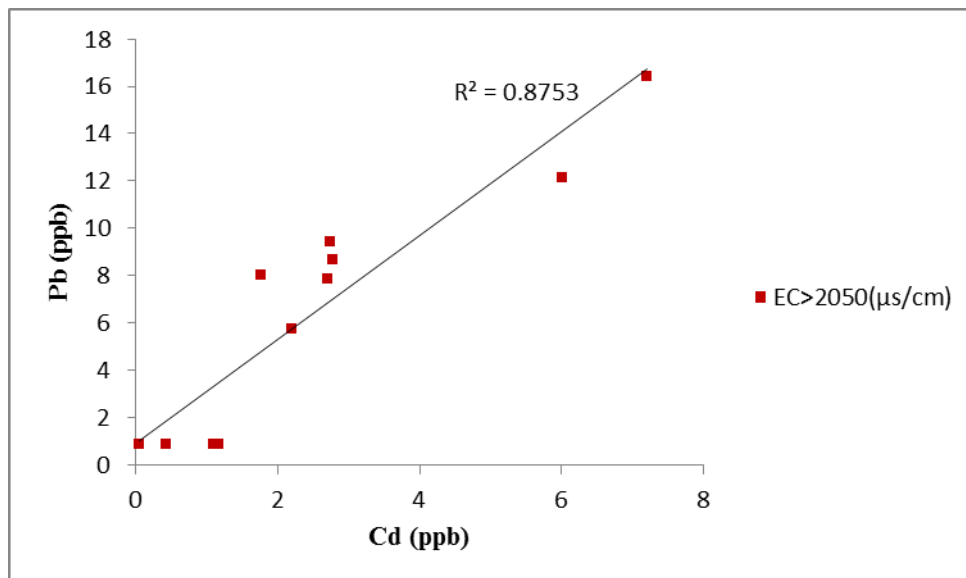
۴-۵-۲- یون نیترات

با توجه به تشریح نتایج بررسی تغییرات آنیون نیترات (بند ۴-۳-۴)، عدم رابطه این پارامتر نسبت به دیگر پارامترها و تغییرات غلظت آنیون نیترات در محدوده آبخوان ابرکوه (شکل ۴-۱۸) نشان از منشأ متفاوت این آنیون است. افزایش غلظت نیترات (بیش از ۳۰ mg/l) در غرب (محل تغذیه آبخوان) تا نزدیک به نواحی مرکزی با توجه به عمق کم سطح آب زیرزمینی، درشت دانه و حاصلخیز بودن خاک منطقه، نوع کشاورزی (درختکاری و نهال‌کاری) و استفاده از کود و سموم دفع آفات توجیه پذیر بوده و منشأ انسان‌زاد دارد. همبستگی نسبتاً خوبی که در غرب آبخوان بین آنیون نیترات و سولفات وجود دارد و افزایش غلظت سولفات در این بخش از آبخوان دلیل دیگری بر تأثیر انسان‌زاد بر کیفیت آب زیرزمینی در این محدوده است.

۴-۵-۳- فلزات سنگین

با توجه به توضیحات قبلی آرسنیک در بین فلزات سنگین منتخب مورد بررسی در نمونه‌های آب، به جز با یون سولفات با هیچ یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده و دیگر فلزات سنگین، همبستگی معنی‌داری ندارد. اما فلزات سنگین کادمیم و سرب دارای همبستگی خوب با یکدیگر و هدایت الکتریکی (EC) یا شوری آب هستند. بنابراین می‌توان گفت توزیع و تغییرات غلظت آرسنیک در محدوده آبخوان ابرکوه احتمالاً دارای منشأ متفاوت از دیگر فلزات سنگین است. رابطه خطی بین تغییرات غلظت سرب و کادمیم در شکل ۴-۳۸ نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین آنها وجود دارد. بنابراین می‌توان فلزات کادمیم و سرب را با توجه به تغییرات و توزیع یکسان غلظت آنها در محدوده آبخوان هم منشأ دانست. به نظر می‌رسد منشأ احتمالی افزایش آرسنیک در بخش شمال

شرقی آبخوان بیشتر طبیعی (زمین‌زاد) باشد. این موضوع نیاز به بررسی بیشتر داشته و با داده های فعلی با قاطعیت نمی‌توان در مورد آن صحبت نمود.



شکل ۴-۳۸ رابطه بین تغییرات غلظت یون‌های سرب و کادمیم در نمونه‌های آبخوان ابرکوه

دو فلز سنگین سرب و کادمیم با شرایط و رفتار یکسان در محدوده آبخوان و وابستگی به دیگر پارامترها شامل هدایت الکتریکی، کاتیون‌های اصلی و آنیون کلر، احتمالاً ناشی از نفوذ آب شور در آبخوان هستند. منشأ آب شور انحلال کانی هالیت (NaCl) بوده که در کفه‌های گلی و رسی حاشیه شرقی آبخوان و کفه شورزار (پلایای) ابرکوه در شرق آبخوان قرار دارد. در مطالعات انجام شده کانی هالیت بیشترین فراوانی را در بین کانی‌های تبخیری اصلی (ژیپس و کلسیت) در پلایای ابرکوه دارد. در این پلایا سولفات سدیم به همراه کانی هالیت به صورت تبخیری در سطح زمین با لایه‌ای به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتیمتر به علت بالا بودن سطح آب زیرزمینی و بعضاً باتلاقی بودن منطقه و تبخیر آب روی سطح زمین متبلور می‌شوند. بخشی از این نمک‌ها توسط بارندگی ناچیز سالیانه یا جریانات سطحی حل شده و مجدداً به اعماق پایین‌تر منتقل می‌شوند. کانی‌های رسی و کوارتز مهمترین کانی‌های همراه این نمک‌ها در پلایای ابرکوه به شمار می‌روند (رضائیان، ۱۳۹۱).

با توجه به تحقیقات انجام شده، شوری تحرک فلزات سنگین در خاک‌ها را افزایش می‌دهد¹⁶ (Acosta et al. 2011). اثر شوری توسط ترکیبات کلریدهای کلسیم، منیزیم و سدیم و سولفات سدیم (CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl , Na_2SO_4) روی تحرک برخی از فلزات سنگین شامل مس، روی، کادمیم و سرب نشان داد که افزایش قدرت یونی توسط نمک‌های مذکور باعث آزاد شدن کادمیم بیشتر از سایر فلزات می‌گردد. اثر نمک‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم بیشترین میزان تحرک فلزات کادمیم و سرب را در پی داشت و کلرید منیزیم بیشترین تحرک مس و کادمیم را منجر شد و سرانجام سولفات سدیم موجب افزایش تحرک مس و کادمیم گردید. میزان تحرک یا جذب فلزات سنگین مذکور در خاک دارای مکانیسم متفاوت به ازای هر فلز می‌باشد که عبارتست از، (۱) رقابت با یون کلسیم در محل یا موقعیت‌های جذب، (۲) ترکیب با کلرید، (۳) ترکیب با سولفات و (۴) رقابت با منیزیم و یا کلسیم. حضور کلرید بیشتر از حضور سولفات، تحرک کادمیم و سرب را افزایش می‌دهد. ترکیبات کلروره، مهمترین مکانیسم تحرک کادمیم و سرب هستند. سولفیدهای کادمیم در آب بسیار نامحلول هستند و اثر شوری آب بر تحرک کادمیم زمانی که سولفیدها فراوان و در حال تشکیل هستند، کاهش می‌یابد. غلظت بالای سولفات در خاک موجب افزایش رسوب و کاهش تحرک فلزات می‌شود. ترکیبات کلروره دفع Cd^{+2} از سطح خاک را افزایش می‌دهند. تشکیل ترکیبات کلروره کادمیم به صورت CdCl_2 ، CdCl^- ، CdCl_3^- و CdCl_4^{2-} است. مکانیسم اصلی تحرک سرب و کادمیم، رقابت با یون کلسیم در جذب سطحی خاک و تشکیل ترکیبات کلروره فلزی و همچنین سولفات‌های کادمیم و سرب در رقابت با یون منیزیم جهت آزادی سازی کادمیم و سرب می‌باشد (Acosta et al. 2011).

با توجه به توضیحات ارائه شده در بالا، نفوذ آب شور از سمت کفه و پلایای ابرکوه به آبخوان در حاشیه شرقی آن که به علت افت ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از چاه‌ها حادث شده است، منشأ تحرک و آزادی کاتیون‌های سرب و کادمیم در آب و افزایش غلظت آن در محدوده جنوب شرقی

¹⁶Salinity increases mobility of heavy metals in soils.

آبخوان و بعضاً شرق و جنوب شرقی شهر ابرکوه می‌باشد. به نظر می‌رسد ترکیب هیدروشیمی آبخوان در حاشیه شرقی شامل کلریدهای سدیم، کلسیم و منیزیم موجب آزادسازی و تحرک یون کادمیم و سرب از سطح خاک (رس‌ها) شده و ترکیبات کلرور فلزات مذکور را تشکیل می‌دهد.

۴-۶- تحلیل آماری

۴-۶-۱- ضریب همبستگی داده‌ها

قبل از بررسی تعیین منشأ غلظت یون‌های اندازه‌گیری شده به روش تحلیل مؤلفه اصلی در آبخوان ابرکوه، ابتدا جهت تعیین میزان وابستگی داده‌ها و یکسان بودن منشأ یون‌ها، ضریب همبستگی بین داده‌های هیدروشیمیایی محاسبه می‌شود. با توجه به توزیع غیر نرمال اغلب داده‌ها، ضریب همبستگی به روش اسپیرمن^{۱۷} طبق جدول ۳-۴ ارائه شده است. بالاترین ضریب همبستگی معنی‌دار مربوط به غلظت یون‌های کلر، سدیم (یون‌های غالب) و هدایت الکتریکی نمونه‌ها در سطح خطای ۱٪ است. در میان داده‌های اندازه‌گیری شده، کمترین میزان همبستگی محاسبه شده مربوط به غلظت آرسنیک از فلزات سنگین به عنوان مستقل‌ترین داده می‌باشد.

جدول ۳-۴ ضریب همبستگی بین داده‌های هیدروشیمیایی نمونه‌های آبخوان ابرکوه (روش اسپیرمن)

Correlations (Spearman's rho)													
	EC	pH	Na	Ca	Mg	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	As	Cd	Pb
EC	1.000												
pH	-.391*	1.000											
Na	.848**	-.300	1.000										
Ca	.700**	-.528**	.554**	1.000									
Mg	.777**	-.331*	.570**	.394*	1.000								
K	.729**	-.519**	.678**	.439**	.701**	1.000							
Cl	.922**	-.345*	.862**	.507**	.810**	.764**	1.000						
SO ₄	.417*	-.385*	.235	.722**	.224	.167	.173	1.000					
HCO ₃	-.179	-.527**	-.137	.124	-.276	-.061	-.227	.301	1.000				
NO ₃	.015	-.003	-.147	.543**	-.220	-.313	-.264	.663**	.149	1.000			
As	-.006	-.046	.089	.125	-.060	-.125	-.097	.432**	.274	.265	1.000		
Cd	.780**	-.532**	.768**	.719**	.651**	.754**	.779**	.287	-.073	-.083	-.062	1.000	
Pb	.681**	-.341*	.676**	.660**	.495**	.644**	.673**	.216	-.106	-.038	-.166	.872**	1.000

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

¹Spearman

۴-۸-۲- تحلیل آماری مؤلفه اصلی PCA^{۱۸}

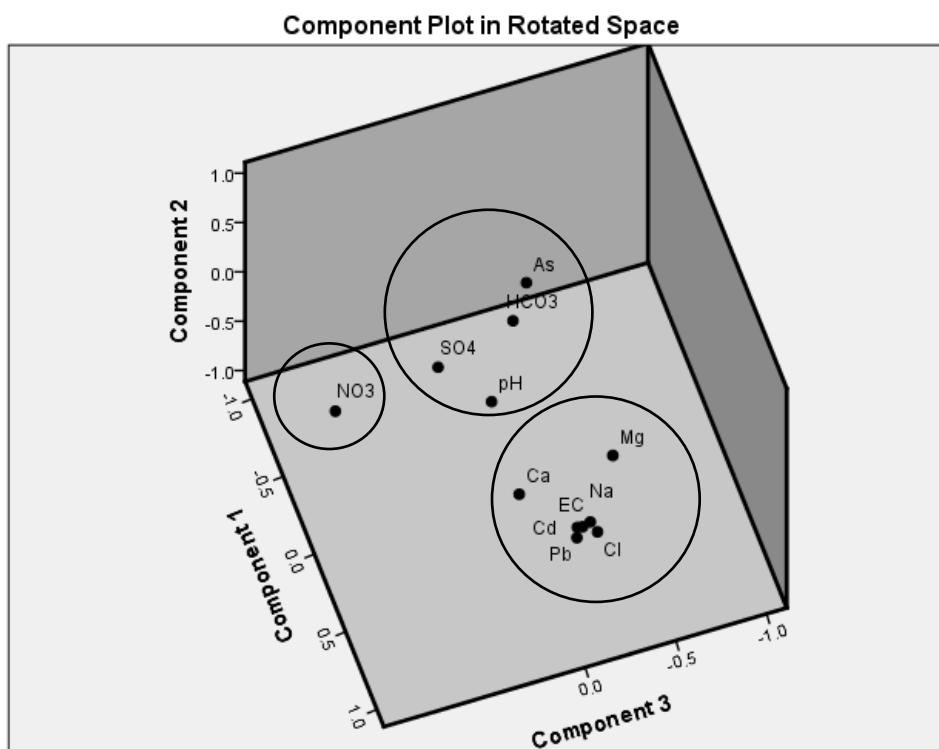
از روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) جهت بررسی منشأ یون‌های اصلی، نیترات و فلزات سنگین نیز استفاده شد. در جدول ۴-۴، مولفه‌های اصلی از بین ۱۲ پارامتر مورد بررسی به روش چرخش با حداکثر واریانس (Varimax) استخراج شد. مؤلفه‌های با بیشترین درصد از واریانس کل به منزله مؤلفه اصلی در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهایی که در هر مؤلفه قرار می‌گیرند، دارای بیشترین همبستگی^{۱۹} (بالاترین کوواریانس) هستند و تغییرپذیری آنها توسط یک عامل یا منشأ کنترل می‌شود (Miller and Miller 2000). در هر مؤلفه بارگذاری بیش از ۰/۵ با اهمیت تلقی می‌شود. بر اساس جدول ۴-۴ و شکل ۴-۳۹، مؤلفه اول بالاترین درصد واریانس را به خود اختصاص می‌دهد و اجزای این مؤلفه نقش مهمی در ترکیب شیمیایی آب دارند. اجزای مؤلفه اول به ترتیب بالاترین ضریب همبستگی مثبت شامل پارامترهای EC، Cl، Pb، Cd، Na، Ca و Mg هستند. این مؤلفه همانطور که ذکر شد مهمترین نقش کنترل کننده ترکیب شیمیایی آب یعنی فرآیند انحلال کانی‌ها از جمله کانی هالیت در ترکیب آب شور آبخوان ابرکوه را دارد. بنابراین نفوذ آب شور در شرق آبخوان عامل اصلی کنترل کننده شیمی آبخوان بوده و نقش تعیین کننده‌ای در تحرک فلزات سنگین سرب و کادمیم و بعضاً تبادل یونی در جانشینی سدیم در جذب سطحی رس‌ها و آزاد شدن یون‌های دیگر از جمله منیزیم و کلسیم دارد. مؤلفه دوم شامل پارامترهای As، HCO₃⁻ و SO₄²⁻ با ضریب همبستگی مثبت و pH با ضریب همبستگی منفی می‌باشد که نشان دهنده منشأ زمین‌زاد آن، احتمالاً در اثر هوازدگی و انحلال کانی آرسنوپیریت می‌باشد. مؤلفه سوم شامل NO₃⁻ بوده که افزایش غلظت آن بیش از حد طبیعی، منشأ انسان‌زاد دارد و عامل آن فعالیت‌های کشاورزی به ویژه در غرب آبخوان است که با توجه به همبستگی معنی‌داری که با یون سولفات دارد با آن هم‌منشأ می‌باشد. نتایج تحلیل مولفه اصلی تأیید کننده مباحث قبلی در خصوص منشأ یون‌ها و فلزات سنگین در آبخوان ابرکوه می‌باشد.

¹⁸ Principal Component Analysis

¹⁹ Correlation

جدول ۴-۴ مؤلفه‌های اصلی استخراج شده به روش چرخش با حداکثر واریانس

پارامتر	مؤلفه		
	یک	دو	سه
EC	.985	.124	-.071
Cl	.986	.003	-.110
SO4	.170	.712	.488
NO3	-.146	.017	.946
HCO3	.041	.731	.031
Na	.951	.037	-.040
Mg	.645	.131	-.312
Ca	.837	.357	.270
As	-.140	.758	-.106
Cd	.964	.072	-.006
Pb	.966	-.029	-.004
pH	-.355	-.721	.012



شکل ۴-۳۹ نمایش سه بعدی مؤلفه‌های اصلی استخراج شده

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

دشت ابرکوه یکی از دشت‌های مهم واقع در جنوب غرب استان یزد با آب و هوای خشک و کویری، از لحاظ توسعه فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و تأمین نیاز آب استان از آبهای زیرزمینی می‌باشد. محصور شدن آبخوان ابرکوه از غرب توسط ارتفاعات آهکی و دولومیتی و از شرق توسط کفه گلی - نمکی (پلایا) و بهره‌برداری از آن جهت فعالیت‌های کشاورزی می‌تواند سبب تغییر در خصوصیات کیفی و کمی آن شود. تغییرات کیفی و زیست محیطی آبخوان و عوامل مؤثر بر آن از نظر ویژگی‌های هیدروشیمیایی و هیدروژئوشیمیایی قابل بررسی و ارزیابی می‌باشند. هدف این پژوهش تحت عنوان هیدروژئوشیمی زیست محیطی آبخوان دشت ابرکوه، شناسایی تأثیر عوامل طبیعی (زمین‌زاد) و غیر طبیعی (انسان‌زاد) بر کیفیت آبخوان است که منجر به تخریب آن شده یا خواهد شد و این امر به تغییر مدیریت بهره‌برداری فعلی و برنامه‌ریزی جهت مدیریت بهینه و حفظ آبخوان منتهی می‌شود.

۵-۲- نتایج

- آبخوان آبرفتی ابرکوه از نوع آبخوان آزاد با افت سطح آب سالانه حدود ۰/۶ متر می‌باشد. با توجه به نقشه هم‌پتانسیل آبخوان ابرکوه جهت کلی جریان در این آبخوان از سمت غرب به سمت مرکز و شرق بوده و منطقه تغذیه آن عمدتاً مربوط به ارتفاعات آهکی و دولومیتی واقع در غرب است. در حاشیه شرقی آبخوان در امتداد کفه و پلایای ابرکوه به دلیل بهره‌برداری بیش از حد و ایجاد مخروط افت جهت جریان معکوس شده و از سمت کفه به سمت داخل آبخوان (شرق به غرب) می‌باشد.
- دامنه تغییرات هدایت الکتریکی در نمونه‌های آبخوان ابرکوه زیاد و از حدود ۱۰۰۰ تا بیش از ۱۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر می‌باشد. بیش از ۶۰ درصد نمونه‌ها دارای هدایت الکتریکی کمتر از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر، عمدتاً در غرب و بخش مرکزی آبخوان واقع شده‌اند. شوری یا املاح آب زیرزمینی در حاشیه شرقی آبخوان (در

مجاورت کفه نمکی) به ویژه در امتداد جنوب شرقی در محدوده مهر دشت و اسفند آباد به حداکثر می‌رسد.

- با توجه به تغییرات مکانی هدایت الکتریکی و ارتباط آن با غلظت یون‌های اصلی در آبخوان ابرکوه، نمونه‌های برداشت شده به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول با هدایت الکتریکی کمتر و مساوی ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر (۲۵ نمونه) واقع در غرب و بخش‌های مرکزی و گروه دوم با هدایت الکتریکی بیش از ۲۰۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر (۱۲ نمونه) واقع در شرق هستند.
- دامنه کم تغییرات pH نمونه‌های آب زیرزمینی ابرکوه از ۶/۸۶ تا ۷/۷۶ می‌تواند ناشی از خاصیت بافری آب به علت افزایش شوری و املاح زیاد باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش قدرت یونی آب و همچنین ایجاد شرایط مناسب برای رسوب کلسیت باشد.
- ترتیب فراوانی غلظت آنیون‌های اصلی به صورت $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ و کاتیون‌های اصلی به صورت $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ است. بنابراین کاتیون سدیم و آنیون کلر یون‌های غالب در آبخوان ابرکوه هستند.
- نمودار توزیع غلظت یون‌ها بر اساس افزایش شوری (هدایت الکتریکی) و نمودار شولر نشان می‌دهند که روند تغییرات غلظت یون‌ها و ترکیب هیدروشیمیایی هر دو گروه نمونه‌ها تقریباً شبیه یکدیگر بوده ولی مقادیر کلر و سدیم در نمونه‌های گروه دو نسبت به سایر یون‌ها افزایش بیشتری داشته است. بنابراین نمونه‌های گروه دو تحت تأثیر احتمالی نفوذ آب شور از حاشیه شرقی آبخوان هستند.
- نیمی از نمونه‌های گروه اول دارای تیپ کلروره و مابقی فاقد تیپ غالب هستند و بیشتر این نمونه‌ها در غرب آبخوان محل تغذیه (فراغه) تا بخش‌های مرکزی (شهر ابرکوه) واقع شده‌اند. تعداد اندکی از نمونه‌های گروه اول واقع در محدوده مهر دشت در محل محدوده بسته افت سطح ایستابی، تیپ آنها نزدیک به کلروره منیزیک هستند. تیپ و رخساره

غالب هیدروشیمیایی نمونه‌های گروه دوم کلروره سدیک می‌باشد. این نمونه‌ها در حاشیه شرقی آبخوان در محدوده شمال شرق و جنوب شرق (اسفند آباد) واقع شده‌اند و تحت نفوذ آب شور از سمت کفه ابرکوه می‌باشند. تعداد کمی از نمونه‌های گروه دوم که در محدوده افت سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند دارای تیپ و رخساره کلروره منیزیک هستند.

- با توجه به نمودار پایپر، آبخوان ابرکوه دارای تیپ و رخساره هیدروشیمیایی غالب مشخصی نیستند. این موضوع احتمالاً ناشی از اختلاط آبها با منشأ تغذیه از ارتفاعات دولومیتی و آهکی غرب و نفوذ آب شور از کفه (پلایا) در شرق است.

- تغییرات مکانی غلظت یون‌های غالب و یون‌های منیزیم، کلسیم و پتاسیم در محدوده آبخوان ابرکوه شبیه تغییرات هدایت الکتریکی می‌باشد. میزان غلظت این یون‌ها در غرب و محور مرکزی آبخوان با توجه به شرایط تغذیه و زمین‌شناسی تقریباً در حد آب شیرین طبیعی می‌باشد. اما در شرق آبخوان به دلیل شرایط زمین‌شناسی (رسوبات کویری و دانه‌ریز رسی و نمکی) و مجاورت با کفه نمکی (پلایا) و نفوذ آب شور غلظت آنها بیشتر از حد آب شیرین طبیعی است.

- تغییرات غلظت یون بی‌کربنات در تمام محدوده آبخوان ابرکوه در حد آب‌های طبیعی با منشأ تغذیه از دولومیت و سنگ‌های آهکی غرب است و یک افزایش نسبی در شمال شرق آبخوان و شرق شهر ابرکوه دیده می‌شود که منشأ زمین‌زاد دارد. غلظت آنیون سولفات در محدوده آبخوان ابرکوه، بیشتر در نقاط غرب و شرق آبخوان دارای افزایش نسبی و بیش از حد غلظت در آب‌های طبیعی است و در شمال شرق آبخوان به حداکثر می‌رسد که منشأ زمین‌زاد دارد و در غرب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است.

- بیشترین غلظت نیترات در نمونه‌های محدوده غرب آبخوان (فراغه) محل تغذیه تا بخش مرکزی آن (شهر ابرکوه) به دلیل عمق کم سطح ایستابی، دانه درشت بودن رسوبات و

تمرکز فعالیت‌های کشاورزی واقع شده است. غلظت یون نیترات در اکثر نقاط محدوده آبخوان بیش از حد طبیعی در آب‌های زیرزمینی است که منشأ انسان‌زاد دارد و احتمالاً از غرب در جهت جریان در کل آبخوان توزیع شده است.

- آبخوان ابرکوه نسبت به کانی‌های کربناته (کلسیت، آراگونیت و دولومیت) در حد اشباع و نسبت به کانی‌های دیگر تحت اشباع است. هالیت انحلال‌پذیرترین کانی در آبخوان می‌باشد. با افزایش هدایت الکتریکی در گروه دوم نمونه‌ها نسبت به گروه اول، متوسط شاخص اشباع افزایش می‌یابد، بطوری که این شاخص در خصوص کانی‌های کربناته به ویژه دولومیت به حداکثر می‌رسد. انحلال‌پذیری هالیت در نمونه‌های گروه دوم نسبت به گروه اول کاهش یافته است.

- با توجه به مدل گیبس، محاسبه نسبت‌های یونی و رسم نمودارهای ترکیبی، مهمترین فرآیند طبیعی کنترل‌کننده هیدروژئوشیمیایی آبخوان ابرکوه انحلال کانی‌های کلسیت، دولومیت (با تغذیه از ارتفاعات غرب)، هالیت و ژپس و همچنین نفوذ آب شور (از سمت کفه نمکی شرق) می‌باشد. تبادل کاتیونی معکوس در حاشیه شرق آبخوان با جایگزینی سدیم در سطح رس‌ها و آزاد شدن منیزیم به نسبت بیشتر از کلسیم در آب فرایند موثر دیگر در شیمی آبخوان ابرکوه می‌باشد.

- توزیع و تغییرات غلظت آرسنیک در محدوده آبخوان ابرکوه دارای منشأ متفاوت از دیگر فلزات سنگین است. منشأ احتمالی افزایش آرسنیک در بخش شمال شرقی آبخوان بیشتر طبیعی (زمین‌زاد) و برای مثال مرتبط با اکسیداسیون کانی‌هایی نظیر آرسنوپیریت باشد. این موضوع نیاز به بررسی بیشتر داشته و با داده‌های فعلی با قاطعیت نمی‌توان در مورد آن صحبت نمود.

- نفوذ آب شور از سمت کفه نمکی ابرکوه به آبخوان منشأ تحرک و آزادی کاتیون‌های سرب و کادمیم در آب و افزایش غلظت آن در محدوده جنوب شرقی آبخوان و بعضاً

شرق و جنوب شرقی شهر ابرکوه می‌باشد. به نظر می‌رسد ترکیب هیدروشیمی آبخوان در حاشیه شرقی شامل کلریدهای سدیم، کلسیم و منیزیم موجب آزادسازی و تحرک یون کادمیم و سرب از سطح خاک (رس‌ها) شده و ترکیبات کلرور فلزات مذکور را تشکیل می‌دهد.

- پارامترهای EC، Cl، Pb، Cd، Na، Ca و Mg با بالاترین ضریب همبستگی مثبت مهمترین نقش کنترل کننده ترکیب شیمیایی آب یعنی فرآیند انحلال کانی‌ها از جمله کانی هالیت در ترکیب آب شور آبخوان ابرکوه را دارد.

- پارامترهای As، HCO_3^- و SO_4^{2-} با ضریب همبستگی مثبت و pH با ضریب همبستگی منفی نشان دهنده منشأ زمین‌زاد آن، احتمالاً در اثر هوازدگی و انحلال کانی پیریت می‌باشد.

- نیتрат که افزایش غلظت آن بیش از حد طبیعی در آب منشأ انسان‌زاد دارد و عامل آن فعالیت‌های کشاورزی به ویژه در غرب آبخوان است که با توجه به همبستگی معنی‌داری که با یون سولفات دارد با آن هم‌منشأ می‌باشد.

- آبخوان ابرکوه از غرب (محل تغذیه) در اثر افزایش یون نیترات و سولفات و توزیع آنها در جهت جریان به سمت مرکز و همچنین هجوم یا نفوذ آب شور از کفه نمکی در حاشیه شرقی آبخوان و تأثیرات آن بر ترکیب هیدروشیمیایی آب، از لحاظ زیست محیطی در حال تخریب می‌باشد و به طور مستقیم و غیرمستقیم منشأ انسان‌زاد دارد.

۵-۳- پیشنهادها

- با توجه به نفوذ آب شور از پهنه نمکی در حاشیه شرقی آبخوان ابرکوه در اثر افت سطح ایستابی ناشی از بهره‌برداری بیش از حد، نیاز به مدیریت و برنامه ریزی میزان برداشت آب

در فصول مختلف جهت افزایش سطح ایستابی با پایش مستمر و تعیین غلظت یون‌های اصلی آب می‌باشد.

- با توجه به عمده فعالیت کشاورزی در آبخوان ابرکوه و دیگر آلودگی‌های شهری و صنعتی، آنالیز کامل فلزات سنگین یا عناصر سمی به روش ICP-MS جهت تعیین نوع فلزات سنگین یا عناصر سمی و تغییرات غلظت آنها مورد نیاز می‌باشد.
- کنترل و مدیریت فعالیت‌های کشاورزی در خصوص میزان و نوع مصرف کودهای کشاورزی و سموم دفع آفات به ویژه در مناطق تغذیه و عمق کم سطح ایستابی آبخوان جهت کاهش ورود یون‌های نیترات و سولفات و احیاناً دیگر فلزات سنگین یا عناصر سمی در منابع آب زیرزمینی لازم و ضروری می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- خلقی م و تاکی ر، (۱۳۸۲) "ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت قزوین" مجله زمین‌شناسی مهندسی، جلد اول، شماره ۳.
- دفتر استانداردها و معیارهای فنی، (۱۳۸۴) "دستورالعمل تعیین هدایت هیدرولیک خاک به روش‌های مختلف"، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریه شماره ۳۲۲.
- رضائیان ع، (۱۳۹۱) "ارزیابی پتانسیل اقتصادی شورابه‌های پلایای ابرکوه" اولین همایش ملی توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه خشک، ابرکوه، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۱.
- روزبه م، دهقان ب و میرحسینی م، (۱۳۸۵) "تحلیل کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ابرکوه" بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- سامانی ج، (۱۳۸۴) "مدیریت منابع آب و توسعه پایدار" دفتر مطالعات زیربنایی، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، کد موضوعی: ۴۱۰، شماره مسلسل: ۷.
- شمسایی ا، (۱۳۹۱) "هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل" جلد دوم، فصل نهم، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.
- عبداللهی م، قشلاقی ا و عباس‌نژاد ا، (۱۳۹۴) "هیدروژئوشیمی زیست محیطی منابع آب زیرزمینی دشت راور (شمال استان کرمان)" محیط‌شناسی، دوره ۴۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۸۱-۹۵.
- فاریابی م، کلانتری ن و نگارستانی ا، (۱۳۸۹) "ارزیابی عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت جیرفت با استفاده از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی" علوم زمین، سال بیستم، شماره ۷۷، صفحه ۱۲۰-۱۱۵.
- مهندسین مشاور پوراب، (۱۳۹۱) "تهیه مدل‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی ابرکوه، گزارش‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی"، شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد.
- نظری ر، آدینه‌وند ر و مشایخی ت، (۱۳۹۰) "طراحی شبکه پایش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت ابرکوه" سی‌امین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- Acosta, J. A., Jansen, B., Kalbitz, K. (2011) "Salinity increases mobility of heavy metals in soils" *Chemosphere* 85, 1318–1324.
- Adams, W. M. (2006) "The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century" Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, 29–31 January 2006.
- Bohlke, J. K., (2002) "Groundwater recharge and agricultural contamination" *Hydrogeology Journal*, 10:153-179.

- Chandrasekar, N., Selvakumar, S., Srinivas, Y., (2013) "Hydrogeochemical assessment of groundwater quality along the coastal aquifers of southern Tamil Nadu, India" *Environ Earth Sci.*, DOI 10.1007/s12665-013-2864-3.
- Davidson, p., Wilson, s. (2011) "Groundwaters of Marlborough" The Caxton Press, Christchurch, New Zealand, Chapter 11, p 94.
- Gannon, John P., Burbey Thomas J., Bodnar Robert J., Aylor Joseph., (2011) "Geophysical and geochemical characterization of the groundwater system and the role of chatham fault in groundwater movement at the Coles Hill uranium deposit, Virginia, USA". *Hydrogeology Journal.*, 20: 45–60.
- Hounslow, A. W., (1995) "Water quality data: analysis and interpretation" Lewis, Boca Raton, FL.
- Kouamé, Innocent K., Kouassi, Lazare K., Dibi, Brou. (2013) "Potential Groundwater Pollution Risks by Heavy Metals from Agricultural Soil in Songon Area" *Journal of Environmental Protection.*, 4, 1441-1448.
- Isa, N. M., Aris. A. Z., Lim, Sulaiman, W. N. A. W., Praveena, S. M., (2013) "Evaluation of heavy metal contamination in groundwater samples from Kapas Island, Terengganu, Malaysia" *Arab J Geosci.*, DOI 10.1007/s12517-012-0818-9.
- Marie, A., Vengosh, A., (2001) "Sources of salinity in ground water from Jericho area, Jordan Valley" *Ground Water.*, 39: 240-248.
- Miller, N. J., Miller, J.C., (2000) "Statistics and chemometrics for analytical chemistry" (4th. ed.), Pearson Education: 288.
- Mohamed, M. A. Mohamed., Hassane Aissata B., (2016) "Hydrochemistry assessment of groundwater quality in Al-Ain city, UAE" *Environ Earth Sci.*, 75:353.
- Montcoudiol, N., Molson, J., (2014) "Groundwater geochemistry of the Outaouais region (Québec, Canada): a regional-scale study" *Hydrogeology Journal.*, DOI 10.1007/s10040-014-1190-5.
- Moore, J. W., Ramamoorthy, S., (1984) "Heavy metals in natural waters. Applied monitoring and impact assessment" Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg Tokyo., ISBN-13: 978-1-4612-9739-0.
- Mueller, David K., Hamilton, Pixie A., Helsel, Dennis R., Hitt, KerieJ., and Barbara C Ruddy., (1995) "Nutrients in ground water and surface water of the United States—An Analysis of Data Through 1992" U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, 95-4031.
- Sharma, K. S., (2015), "Heavy Metals In Water: Presence, Removal and Safety", Department of Chemistry, JECRC University, Jaipur, India, Published by the Royal Society of Chemistry, www.rsc.org, Print ISBN: 978-1-84973-885-9.

- Soltani, S., Moghaddam, A. A., Barzegar, R., (2017) " Hydrogeochemistry and water quality of the Kordkandi-Duzduzan plain, NW Iran: application of multivariate statistical analysis and PoS index" *Environ Monit Assess.*, 189:455, DOI 10.1007/s10661-017-6171-4.
- Stumm, W., Morgan, J. J., (1996) "Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters" 3rd edn, Wiley, New York.
- Thiros, S. A., Bexfield, L. M., Anning, D. W., Huntington, J. M., (2010). "Conceptual understanding and groundwater quality of selected basin-fill aquifers in the Southwestern United States" U. S. Geological Survey Professional Paper 1781., 288p.
- Thilagavathi, R., Chidambaram, S., Prasanna, M. V., Thivya, C., Singaraja, C., (2012) "A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, southeast India" *Appl Water Sci.*, 2:253–269.
- Tlili-Zrelli, B., Hamzaoui-Azaza, F., Gueddari, M., Bouhlila, R., (2012) "Geochemistry and quality assessment of groundwater using graphical and multivariate statistical methods. A case study: Grombalia phreatic aquifer (Northeastern Tunisia)" *Arab J Geosci.*, 6:3545–3561, DOI 10.1007/s12517-012-0617-3.
- Todd, D. K., Mays, L. W., (2005) "Groundwater hydrology" Third edition, Wiley., ISBN 0-471-45254-8 (WIE).
- WHO (World Health Organization)., (2011) "Guidelines for Drinking water Quality" 1:4th edition.
- Zandaryaa, S., (2014) "Water in the post-2015 development agenda and sustainable development goals" International Hydrological Programme (IHP), UNESCO.
- Zaidi, F. K., Nazzal, Y., Jafri, M. K., Naeem, I. A., (2015) " Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia" *Environ Monit Assess.*, 187:607, DOI 10.1007/s10661-015-4828-4.

Abstract

Abarkooh alluvial aquifer is located in southwest of Yazd city at the center of Iran. Groundwater is the main source for irrigation and domestic uses, considered as the potential causes of groundwater contamination in this plain. The study was carried out to assess hydrogeochemical properties of groundwater with the aim to find probable sources of major contaminants including nitrate and heavy metals. In this regard 37 water samples were collected and analyzed for major ions (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃ and SO₄), nitrate and heavy metals with environmental priority including arsenic (As), lead (Pb) and cadmium (Cd). Values of electrical conductivity (EC) increase from recharge area at the west to the eastern discharging parts where the playa is present. The abundance of cations and anions vary in the order of Na⁺>>Mg²⁺>Ca²⁺>K⁺ and Cl⁻>>SO₄²⁻>HCO₃⁻, respectively. Due to spatial variations of electrical conductivity and its relationship with the main ions concentration, the samples were divided into two groups: EC ≤ 2050 μs/cm and EC > 2050 μs/cm. The highest values of Na and Cl are observed at the east where the saline water intrusion is probable due to the intensive abstraction of groundwater which reverses the flow direction. There is no dominant water type in the Abarkooh aquifer. Pb and Cd is highly correlated with Na, Cl and EC, confirm their geogenic source due to saline water intrusion. Nitrate is high at the west where the un-managed application of fertilizers in agricultural lands is so dominant. A geogenic source for As was proposed based on the results of principal component analysis (PCA). The study confirms the main role of anthropogenic processes in contamination of Abarkooh aquifer generally resulted from over-exploitation of the aquifer and agricultural activities.

Key words: nitrate, heavy metal, geogenic, anthropogenic, Abarkooh, Iran



Shahrood University of Technology

Faculty of Earth Sciences

M.Sc. Thesis in Environmental Geology

**Environmental Hydrogeochemistry of Abarkooh Plain
Aquifer, Yazd Province**

By: Mojtaba Meraat

**Supervisor:
Dr Hadi Jafari**

**Adviser:
Dr Afshin Qeshlaqi**

January 2018